



Projet COLAGANG

Étude de la **CO**nnectivité écologique intra-**LAG**unaire : suivis des déplacements des **ANG**uilles européennes produites par deux bassins versants de l'étang du Vaccarès (COLAGANG)

2021-2025 – Rapport Final - décembre 2025



Maîtres d'ouvrage :



Prestataire :



Partenaires techniques :



Co- financeurs :



○ Responsables scientifiques

Delphine Nicolas Chargée de Recherche en ichtyologie, Tour du Valat
Claire Tetrel Conservatrice des Grandes Cabanes Sud, OFB

nicolas@tourduvalat.org
claire.tetrel@ofb.gouv.fr

○ Equipe technique permanente

Benoît Girard Technicien OFB
Emilie Laurent Ingénieure d'Etudes, Tour du Valat
Pascal Contournet Technicien de Recherche, Tour du Valat
Raquel Ambrosio Technicienne de Recherche, Tour du Valat
Samuel Hilaire Technicien de Recherche, Tour du Valat

○ Postdoctorante

Amélie Hoste Terrain, analyse des données & modélisation

○ Services civiques, alternants & CDD

Ana Pires, Annjo Jailliet, Chloé Lefebvre, Corentin Doléans, Emilie Raynard, Klervi Verbrugge, Louison Charrier, Lucas Varoqueaux, Margot Metayer-Rouchaleou, Alice Valles

○ Stagiaires

Cléa Leclerc (M2 - RFID), Emilie Raynard (M2 - Acoustique), Hugo Vey Payre (M2 - Otolithométrie), Matthieu Ellul (L. Pro)

○ Equipe habilitée à la pêche électrique OFB DIR PACA-Corse, pôle éco-hydraulique et autres appuis OFB

Fabrice Laval, Gaël Karczewski, Jimmy Marriate, Julien Serra, Patrick Touron, Mickael Cagnant, Jean-Marc Fau, Amandine Capel, Richard Marc, Benoit Fayard, Siham Belhaf

○ Installation & Maintenance des stations d'écoute RFID (Prestataire)

Alexandre Richard, Arnaud Caudron, Jean-Baptiste Torterotot (Scimabio Interface)

○ Veille à la recapture d'anguilles marquées en acoustique

Christian Ribero, Michel Bénézech (Pêcheurs professionnels)

○ Intervenants externes

Elsa Amilhat et Betty Falliex (CEFREM, Perpignan Université), Jordane Lambremom (MRM), Emmanuelle Migne (SNPN), Hervé Pella (INRAE Lyon), Julien Dublon (INRAE Aix-en-Provence), Olivier Mercier et Sylvie Tomanova (OFB)

○ Vétérinaire référent

Emmanuel Leguay (Vetofish)

○ Comité de pilotage

Cécile Zys (Agence de l'eau) ; Romain Brusson (CNR) ; Yann Laurens, Fanny Rouxelin (WWF) ; Dominique Beaudou, Pierre Caessteker, Pierre Sagnes et Sylvie Tomanova (OFB) ; Thomas trancart (MNHN) ; Elsa Amilhat et Betty Falliex (CEFREM, Perpignan Université) ; Jérôme Bourgea (Ifremer) ; Nathalie Barré, Katia Lombardini et Virginie Maclert (Pôle Relais Lagunes) ; Marion Peguin et Marie-Claude Serra (Conservatoire du Littoral) ; Stéphanie Bertrand (CD13) ; Marie-Claude Contreras, Benjamin Aubert (Mairie des Saintes-Maries-de-la-Mer) ; Pierre Campton, Chloé Lefevre (MRM) ; Alexandre Crestey, Maëlys Marage, Delphine Marobin, Laetitia Poulet et Lucie Schaeffer (PNRC) ; Luc Belenguier et Gaël Hemery (SNPN) ; Laetitia Dupaquis et Estelle Ferrari (DREAL) ; Stéphanie Brenier (DDTM13).

○ Citation

Nicolas, D., Hoste, A., Contournet, P., Girard, B., Hilaire, S., Laurent, E., Raynard, E., Tetrel, C., 2025. Etude de la Connectivité écologique intra-Lagunaire : suivis des déplacements des Anguilles européennes produites par deux bassins versants de l'étang du Vaccarès (Projet COLAGANG, 2021-2025). Rapport Final. Tour du Valat / Office français de la biodiversité. 52 p + Annexes

Table des matières

RESUME DES OBJECTIFS & RESULTATS	7
EN BREF, LES ACTIONS MENEES DEPUIS 2021	10
CONTEXTE REGLEMENTAIRE.....	11
INTRODUCTION	12
OBJECTIFS	15
PRESENTATION DES SITES D'ETUDE : FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE & VOIES D'ECHAPPEMENT.....	17
<i>Canal du Fumemorte.....</i>	<i>17</i>
<i>Bassin des Grandes Cabanes.....</i>	<i>18</i>
CONTEXTE CLIMATIQUE	20
CARACTERISATION DE LA STRUCTURE DEMOGRAPHIQUE DES 2 SOUS-POPULATIONS D'ANGUILLES	21
<i>Capture des anguilles.....</i>	<i>21</i>
<i>Abondance des captures.....</i>	<i>23</i>
<i>Sex-ratio.....</i>	<i>24</i>
<i>Âge à l'argenture.....</i>	<i>24</i>
<i>Marquage.....</i>	<i>25</i>
QUAND SE DEROULE L'ECHAPPEMENT DES ANGUILLES ?	27
SUIVI PAR TELEMETRIE RFID	27
ETAT DE FONCTIONNEMENT & EFFICACITE DES STATIONS RFID	27
DETECTIONS DES INDIVIDUS PAR LES STATIONS RFID	28
PERIODE D'ECHAPPEMENT.....	30
<i>Variation interannuelle de l'effectif des anguilles argentées à l'échappement.....</i>	<i>30</i>
<i>Variation intra-annuelle de l'effectif des anguilles argentées à l'échappement.....</i>	<i>31</i>
SOUS QUELLE INFLUENCE SE DEROULE L'ECHAPPEMENT ?.....	32
PAR OU S'ECHAPPENT LES ANGUILLES ?.....	34
ELEMENTS DE REPONSES OBTENUS A PARTIR DES DETECTIONS RFID.....	34
ETUDE DES VOIES D'ECHAPPEMENT PAR TELEMETRIE ACOUSTIQUE.....	35
<i>Mise en place du réseau des hydrophones.....</i>	<i>36</i>
<i>Marquage acoustique.....</i>	<i>36</i>
<i>Détections acoustiques.....</i>	<i>37</i>
<i>Détection d'un acte de prédation.....</i>	<i>43</i>
DISCUSSION GENERALE	44
<i>Des méthodes adaptées et complémentaires.....</i>	<i>44</i>
<i>Phénologie de l'échappement.....</i>	<i>45</i>
<i>Influence des variables environnementales.....</i>	<i>46</i>
<i>Un effet piège de la poldérisation non concluant.....</i>	<i>47</i>
<i>Une connexion restaurée qui joue son rôle de corridor écologique.....</i>	<i>47</i>
<i>La voie d'échappement du Petit Rhône : un cheminement inverse insoupçonné.....</i>	<i>47</i>
<i>La voie de l'hydrosystème du Vaccarès : une voie privilégiée mais peu fonctionnelle.....</i>	<i>48</i>
<i>Les obstacles à l'échappement.....</i>	<i>48</i>
<i>Préconisation de mesures de gestion.....</i>	<i>50</i>
CONCLUSION & PERSPECTIVES	51
COMMUNICATION	52
REMERCIEMENTS	52

ANNEXE 1 – PRESENTATION DES DEUX SITES D’ETUDE : SUPPLEMENTS D’INFORMATIONS	53
<i>Le bassin du Fumemorte</i>	<i>53</i>
<i>Le bassin des Grandes Cabanes.....</i>	<i>54</i>
ANNEXE 2 – CYCLE DE VIE DE L’ANGUILLE EUROPEENNE	59
ANNEXE 3 – FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES	60
<i>Bassin des Grandes Cabanes</i>	<i>60</i>
<i>Ouvrage de l’ASA de la Sigoulette</i>	<i>61</i>
<i>Pertuis de la Fourcade</i>	<i>62</i>
<i>Pertuis de la Comtesse</i>	<i>63</i>
ANNEXE 4 – EXPLORATION DES DONNEES METEOROLOGIQUES	65
ANNEXE 5 – EFFORT DE PECHE SCIENTIFIQUE POUR LE SUIVI EN CAPTURE-MARQUAGE-RECAPTURE DE L’ANGUILLE	67
<i>Suivi à l’aide d’un système passif : la pêche aux filets.....</i>	<i>67</i>
<i>Suivi par pêche électrique</i>	<i>71</i>
ANNEXE 6 - INVENTAIRE DES ESPECES PISCICOLES	74
ANNEXE 7 - DETERMINATION DE L’AGE A L’ARGENTURE PAR OTOLITHOMETRIE	80
<i>Echantillonnage.....</i>	<i>80</i>
<i>Lecture des otolithes</i>	<i>81</i>
ANNEXE 8 - BIOMETRIE & MARQUAGE RFID	83
ANNEXE 9 – LA TELEMETRIE RFID	88
<i>Le principe</i>	<i>88</i>
<i>Composition d’un dispositif RFID.....</i>	<i>88</i>
ANNEXE 10 – INSTALLATION DES STATIONS D’ECOUTE RFID FIXES.....	90
<i>Canal du Fumemorte.....</i>	<i>90</i>
<i>Bassin des Grandes Cabanes.....</i>	<i>93</i>
ANNEXE 11 – SUIVI DE L’ETAT DE FONCTIONNEMENT DES STATIONS D’ECOUTE RFID FIXES	97
<i>Détections des marker-tags</i>	<i>97</i>
<i>Tests manuels de portée de détection.....</i>	<i>98</i>
<i>Enregistrements de détection d’individus marqués</i>	<i>99</i>
<i>Etat de fonctionnement des stations RFID</i>	<i>100</i>
ANNEXE 12 - PROBABILITE DE DETECTION DES ANGUILES MARQUEES PAR STATION RFID	102
<i>Estimation de la probabilité de détection pour les stations avec un double rideau d’antennes..</i>	<i>102</i>
<i>Estimation de la probabilité de détection d’une station RFID à partir des recaptures par pêche</i>	<i>105</i>
ANNEXE 13 – MODELISATION BAYESIENNE DES PERIODES D’ECHAPPEMENT ET DE L’INFLUENCE DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX.....	107
<i>Méthodologie.....</i>	<i>107</i>
<i>Graphiques exploratoires relatifs aux détections d’individus marqués.....</i>	<i>113</i>
ANNEXE 14 – TRACKING ACTIF RFID	115
<i>Détections au stand de biométrie</i>	<i>115</i>
<i>Suivi en tacking actif dans le milieu</i>	<i>115</i>
<i>Détections de recaptures par la pêche professionnelle.....</i>	<i>116</i>
<i>Exploration des détections RFID.....</i>	<i>117</i>
ANNEXE 15 – TELEMETRIE RFID OU ACOUSTIQUE ? AVANTAGES & INCONVENIENTS.....	118
ANNEXE 16 – MISE D’EN PLACE DU SUIVI PAR TELEMETRIE ACOUSTIQUE	119

<i>Tests pour la disposition du réseau des hydrophones</i>	119
<i>Acquisition du matériel et installation des hydrophones</i>	122
<i>Zoom par secteur sur la localisation des hydrophones</i>	124
ANNEXE 17 - MARQUAGE ACOUSTIQUE	126
<i>Collaboration avec les pêcheurs professionnels</i>	127
ANNEXE 18 – EXPLORATION DES DETECTIONS ACOUSTIQUES	130
ANNEXE 19 – ANALYSE D’IMAGES SATELLITES	132
ANNEXE 20 – COMMUNICATION	133
REFERENCES	134

Résumé des objectifs & résultats

Ce projet visait à améliorer les connaissances concernant la démographie, la phénologie et les déplacements migratoires de deux sous-populations d'anguilles camarguaises localisées en amont de l'étang du Vaccarès, associées à des milieux dominés par l'eau douce : le canal de drainage de l'ASA (Association Syndicale Autorisée) du Fumemorte et le bassin des Grandes Cabanes Sud. Tandis que le bassin du Fumemorte est connecté à l'hydrosystème du Vaccarès (milieu dit « ouvert » sur la mer), le bassin des Grandes Cabanes était, en début de projet, déconnecté du Vaccarès depuis plusieurs décennies (milieu dit « fermé » ou « poldérisé »). Ce dernier a été reconnecté à l'étang du Vaccarès durant l'été 2023.

Ce projet répond aux objectifs de suivis d'échappement requis par le plan national de gestion de l'anguille et le PLAGEPOMI (plan de gestion des poissons migrateurs) Rhône Méditerranée, l'hydrosystème lagunaire du Vaccarès étant l'un des 11 systèmes retenus en France pour suivre l'état de la population de l'anguille européenne. Il est intégré au Plan Rhône.

OBJECTIF 1 : Étudier le devenir des anguilles dans les bassins poldérisés

Le premier objectif visait à étudier l'impact des systèmes camarguais poldérisés sur le devenir des anguilles. Les bassins poldérisés sont des bassins déconnectés de l'étang du Vaccarès : ils sont irrigués par le Rhône, le plus souvent par pompage, et les eaux de drainage sont réacheminées par pompage au Rhône.

- **Résultat 1.1** : La lecture d'âge par otolithométrie d'anguilles argentées femelles n'a pas permis de mettre en évidence un éventuel piégeage des anguilles dans le système des Grandes Cabanes (Vey-Payre 2022). En moyenne, les anguilles femelles dans le bassin des Grandes Cabanes sont âgées de 6 ans à l'argenture, tandis que celles du canal de drainage de l'ASA du Fumemorte ont 10 ans.
- **Résultat 1.2** : La reconnexion du canal de drainage de l'ASA de la Sigoulette dès la première saison de suivi de l'échappement par **télémétrie RFID** (*Radio Frequency Identification*), du fait de la mise en œuvre du plan de sauvegarde de l'étang du Vaccarès (Ricque et al. 2025), n'a pas permis d'étudier le passage des anguilles des Grandes Cabanes dans un système clos. Dès le début du projet, un nombre de détections significatif a été enregistré à la station RFID au niveau de la prise gravitaire au Petit Rhône. Ces résultats ont montré qu'un nombre non négligeable d'anguilles argentées des Grandes Cabanes (22%) ont remonté le canal d'alimentation pour chercher à rejoindre la mer *via* le Petit Rhône. Cette proportion d'anguilles argentées empruntant la voie du Petit Rhône fut d'ailleurs relativement constante (entre 21 et 39%) dans les années qui ont suivi, malgré la reconnexion avec l'étang du Vaccarès.
- **Résultat 1.3** : Lors de la deuxième saison de suivi en **télémétrie acoustique** (2024-2025), deux hydrophones ont été installés dans le bras du Petit Rhône. Les détections de ces hydrophones ont confirmé l'échappement de 15 anguilles argentées femelles *via* le Petit Rhône. Par conséquent, **il n'est plus possible de considérer que les Grandes Cabanes fut un système clos pour les anguilles, même avant les travaux de reconnexion**. Le site des Grandes Cabanes n'a donc pas permis d'étudier l'impact des bassins poldérisés en Camargue sur l'anguille européenne.

OBJECTIF 2 : Evaluer la reconnexion écohydrologique entre le Petit Rhône et l'étang du Vaccarès

Cette étude visait à évaluer le succès du projet de restauration de continuité écologique innovant entre fleuve, marais endigué et masse d'eau de transition : entre le Petit Rhône, les Grandes Cabanes et l'étang du Vaccarès.

- **Résultat 2.1** : L'année précédant les travaux de reconnexion, aucune anguille n'a été détectée par **télémétrie RFID** à proximité de la reconnexion, confirmant que ce ne pouvait pas être une voie de dévalaison alors envisageable.
- **Résultat 2.2** : Depuis juin 2023, les eaux du bassin des Grandes Cabanes s'écoulent gravitairement dans l'étang du Vaccarès *via* un chenal restauré (travaux financés hors projet). Les détections enregistrées à la station RFID située dans le chenal de reconnexion ont mis en évidence que dès l'automne 2023, les

anguilles utilisaient cette nouvelle connexion. Cette nouvelle voie de dévalaison est depuis bien fonctionnelle. Chaque année, entre 61 et 79% des anguilles argentées marquées utilisent cette nouvelle voie pour sortir du système.

OBJECTIF 3 : Étudier la dynamique d'échappement dans le temps

Ce projet avait également pour objectif d'identifier les périodes et les facteurs environnementaux impliqués dans le processus d'échappement des anguilles argentées, afin de préconiser des mesures de gestion pour optimiser leur retour en direction de la mer. Disposer du même type de suivis entre deux bassins hydrographiques localisés à l'Est (Fumemorte) et l'Ouest (Grandes Cabanes) de l'étang du Vaccarès constituait une opportunité unique pour étudier la connectivité à l'intérieur d'un système lagunaire, entre canaux, marais et étangs.

- **Résultat 3.1** : Les campagnes de pêche scientifique menées entre octobre et avril ont permis de capturer un total de 5078 anguilles dans le bassin des Grandes Cabanes, dont 716 étaient argentées, et un total de 1277 individus dans le bassin du Fumemorte, dont 148 étaient argentés. Que ce soit aux Grandes Cabanes ou dans le Fumemorte, la majorité des individus argentés était des femelles (respectivement 86%, n=613, et 92%, n=136). Les résultats de notre étude caractérisent ainsi surtout l'échappement d'**anguilles argentées femelles**.
- **Résultat 3.2** : L'échappement par télémétrie RFID a été suivi pendant 5 saisons d'échappement pour la sortie aval du bassin du Fumemorte (Fume-Aval, 2020 à 2025) mais uniquement 3 sont considérées comme valides ; et pendant 3 saisons pour la sortie amont (GC-Amont, côté Petit Rhône) et les sorties aval dénommées Ivrognes et Pompe des Grandes Cabanes (2022 à 2025), et seulement de 2 saisons d'échappement pour la sortie aval au niveau de la reconnexion des Grandes Cabanes (GC-Aval, 2023 à 2025). Globalement, les détections RFID indiquent que la période d'échappement des anguilles argentées s'étend **de l'automne au printemps**.

Au niveau des Grandes Cabanes, les mois de **novembre, décembre, mars et avril** sont ceux où le taux d'échappement est le plus important, avec toutefois des différences entre les deux voies principales d'échappement. À l'aval, du côté de la connexion avec l'étang du Vaccarès, l'échappement des anguilles est le plus fort en novembre, tandis qu'à l'amont, du côté du Petit Rhône, il l'est plutôt en décembre et en mars. A l'aval du bassin du Fumemorte, les échappements s'effectuent surtout de décembre à mars.

- **Résultat 3.3** : L'échappement des anguilles argentées est fortement dépendant d'un patron saisonnier, avec un effet important de la température. D'autres facteurs environnementaux tels que la phase lunaire, le vent, le niveau d'eau et la conductivité ont également une influence sur l'échappement, pour au moins un des sites étudiés. En effet, les effets environnementaux obtenus varient en fonction des sites, soulignant la variabilité de la dynamique d'échappement des anguilles à l'échelle locale.
- **Résultat 3.4** : Ce suivi ayant eu lieu uniquement sur 3 saisons d'échappement concernant les Grandes Cabanes, il est difficile d'identifier des variations interannuelles. Il est nécessaire de maintenir ce suivi sur davantage d'années afin de parvenir à estimer les variations de dynamique d'échappement au cours du temps. De plus, les conditions environnementales ayant été fortement contrastées durant les années de suivi, il est compliqué de discriminer les effets environnementaux des effets temporels avec les données actuellement acquises.

OBJECTIF 4 : Déterminer les voies d'échappement privilégiées

La télémétrie RFID couplée à la télémétrie acoustique a visé à mieux appréhender quelles voies d'échappement sont privilégiées par les anguilles argentées pour retourner en mer. Une fois dans l'étang du Vaccarès, à l'aval des deux bassins étudiés, les anguilles argentées ont deux possibilités pour rejoindre la mer : soit en passant par le pertuis de la Fourcade, soit en passant par le pertuis de la Comtesse puis les étangs et salins des marais de Camargue (EMSC). Les anguilles des Grandes Cabanes pourraient également décider de remonter le canal d'alimentation et rejoindre la mer *via* le petit Rhône.

Tandis que le suivi en télémétrie RFID s'est focalisé sur les détections d'individus à proximité des exutoires des bassins ciblés, le suivi en télémétrie acoustique a été déployé jusqu'aux portes de la mer.

- **Résultat 4.1 :** Les détections enregistrées par télémétrie RFID et acoustique montrent une forte variabilité du comportement migratoire des anguilles marquées, que ce soit en termes de phénologie, de rapidité, de cheminement et de voies empruntées.
 - **Résultat 4.2 :** Le suivi en télémétrie acoustique a été déployé durant deux saisons d'échappement (2023-2024, n=41 individus marqués, et 2024-2025, n=85 individus marqués) et a ciblé uniquement des individus femelles argentées de plus de 60 cm.
 - **Résultat 4.3 :** Aux bassins des Grandes Cabanes, les détections par télémétrie RFID montrent que, durant les 3 saisons d'échappement, la plupart des individus argentés cherchent à s'échapper, au moins en première instance, *via* la sortie aval, en direction de l'étang du Vaccarès (de 61%, n=129 en 2023-2024, à 79%, n=106 en 2024-2025). Néanmoins, tous les ans, une proportion non négligeable d'individus se présentent à l'amont du système (de 21%, n=29 en 2024-2025 à 39%, n=82 en 2023-2024). Les détections acoustiques montrent également que la plupart des individus des Grandes Cabanes s'échappent en direction de l'étang du Vaccarès (74% la première saison et 48% la deuxième), mais que certaines se présentent aussi à l'amont (26% et 36%, respectivement).
 - **Résultat 4.4 :** Seulement 3 individus sur les 72 marqués en acoustique et détectés à l'aval des deux bassins ciblés ont été ensuite détectés à l'un des deux pertuis. Une seule anguille provenant des Grandes Cabanes se présente au pertuis de la Comtesse sans pouvoir passer le 16 décembre 2023. Une anguille provenant du Fumemorte reste bloquée au pertuis de la Fourcade de mars à avril 2024. En 2024-2025, aucune anguille ne s'est présentée au pertuis de la Fourcade, et une seule, provenant du Fumemorte a traversé le pertuis de la Comtesse. Ces résultats mettent en évidence des discontinuités écologiques au sein de l'hydrosystème du Vaccarès, qui pourraient avoir différentes explications : présence et fermeture d'ouvrages de connexion, prélèvements par prédation, prélèvements par pêche, apparition de zones d'assecs ou d'hypersalinité.
- Tandis que la saison 2023-2024 a été marquée par une très forte sécheresse et des discontinuités entre l'étang du Vaccarès et la mer du fait d'assecs ou d'eaux hypersalées, les conditions environnementales durant la saison 2024-2025 ont été *a priori* plus favorables à la circulation des anguilles avec des niveaux d'eau plus élevés et des salinités plus douces. Cependant, nos résultats n'ont pas montré un plus fort taux d'échappement des individus argentés. Ainsi, le devenir des individus marqués en acoustique reste une inconnue à élucider.
- **Résultat 4.5 :** Grâce à l'installation d'un nouvel hydrophone à l'aval du Petit Rhône lors de la saison 2024-2025, la voie d'échappement des anguilles des Grandes Cabanes *via* la Petit Rhône a pu être confirmée. Sur les 25 individus marqués en acoustique qui se sont présentés à l'amont des Grandes Cabanes, 15 ont été détectés à l'aval du Petit Rhône. Il s'agit donc de la seule voie d'échappement connue fonctionnelle à ce jour, uniquement pour des individus femelles capturés et marqués dans le bassin des Grandes Cabanes.

En bref, les actions menées depuis 2021



- **Caractérisation de la structure démographique des 2 sous-populations d'anguilles**

- Détermination de l'âge à l'argenture par otolithométrie pour 4 lots d'anguilles provenant de 4 sites différents.
- Mise en place de suivis en Capture-Marquage-Recapture (CMR) par pêche des 2 sous-populations d'anguille, dans le but d'étudier les caractéristiques démographiques et de surveiller leurs évolutions.
- Obtention des autorisations ministérielles pour les procédures expérimentales de marquage.
- Formation de 2 agents de l'OFB et d'un agent de la Tour du Valat (TDV) en 2022, et d'un agent de la TDV en 2024 en expérimentation de la faune sauvage et en chirurgie animale.
- Réalisation de campagnes de terrain pour capturer et marquer des anguilles d'octobre 2021 à avril 2025:
 - Bassin des Grandes Cabanes : 5 078 anguilles capturées et 2 244 marquées avec un transpondeur RFID de 23 mm.
 - Canal du Fumemorte : 1 277 anguilles capturées et 834 marquées avec un transpondeur RFID de 23 mm.



- **Suivi des paramètres environnementaux**

- Suivis manuels et en continu de la température, de la conductivité et du niveau d'eau en différents points avec des sondes multiparamétriques.
- Installation d'un débitmètre au niveau de la reconnexion des Grandes Cabanes avec l'étang du Vaccarès.



- **Détermination de la période d'échappement par télémétrie RFID**

- Mise en place d'un suivi en télémétrie RFID pour enregistrer en continu toute l'année le passage d'individus marqués à six stations d'écoute positionnées à des points stratégiques pour permettre de caractériser les échanges d'anguilles entre les bassins ciblés (Fumemorte et Grandes Cabanes) et les systèmes adjacents (étang du Vaccarès, et Petit Rhône pour les Grandes Cabanes).
- Veille du fonctionnement et des portées de détection des 6 stations d'écoute fixes.

- **Suivi par tracking RFID actif** : quelques campagnes tests ont été réalisées afin de tester la localisation d'anguilles marquées toujours présentes dans les bassins ciblés.



- **Caractérisation des voies empruntées par télémétrie acoustique**

- Mise en place d'un suivi télémétrique acoustique permettant de suivre le retour d'anguilles marquées depuis l'embouchure des deux bassins versants suivis (Grandes Cabanes et Fumemorte) jusqu'aux portes de la mer.
- Marquage acoustique de 121 anguilles femelles argentées.
- Installation et maintenance d'un réseau de 16 hydrophones en 2023-2024, et de 24 hydrophones en 2024-2025.
- Echanges avec les pêcheurs professionnels pour veiller aux éventuelles recaptures.

Contexte réglementaire

Le projet répond aux objectifs du règlement du **conseil européen** (n°1100/2007), du **Plan de Gestion National (PGN) pour l'anguille européenne** et au plan de gestion des poissons migrateurs Rhône Méditerranée (**PLAGEPOMI**) **2022-2027**. L'étang du **Vaccarès** fait partie des systèmes retenus par le PGN pour suivre l'état de la population de l'anguille européenne. Le projet aborde plusieurs objectifs du PLAGEPOMI : son orientation 1 qui vise la **reconquête des axes de migration**, son orientation 3, qui cherche à veiller à **l'évolution des populations** et développer des **outils décrivant l'échappement**, et son orientation 4 qui vise à **améliorer la connaissance sur les espèces et leurs habitats pour en optimiser la gestion**. Le projet cherche en particulier à répondre à la question-clé 2 : « **Quelles sont les voies de migration privilégiées ? Quels facteurs les déterminent ?** » et à la question-clé 4 : « **Quels sont les facteurs de pression anthropiques sur les espèces, autres que les obstacles à la continuité écologique, sur lesquels il est possible d'agir à l'échelle du bassin ?** »

La zone d'étude est située au cœur du **delta du Rhône**, sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer (département des Bouches-du-Rhône), au cœur du **Parc naturel régional de Camargue** et des périmètres des **sites Natura 2000 « Camargue » FR9301592** et **FR9310019** respectivement désignés en application des directives « Habitats, Faune, Flore » (92/43/CEE) et « Oiseaux » (79-409/CEE). La Camargue est un **site Ramsar** reconnu d'importance internationale (n°786) et une **réserve de biosphère** de l'UNESCO (Réserve de Biosphère de Camargue). Le territoire du projet est situé dans le **sous-bassin Camargue** (DU_13_08 Camargue). Ce sous-bassin est caractérisé d'après le **SDAGE 2016-2021** par une forte vulnérabilité au changement climatique pour les enjeux biodiversité et le niveau trophique des eaux.

Ce projet s'inscrit en cohérence avec les orientations fondamentales du **SDAGE 2022-2027**, tout particulièrement l'orientation **OF 6** : « *Préserver et restaurer le fonctionnement des milieux aquatiques et des zones humides* » et plus particulièrement ses déclinaisons **OF 6A-O6** (« *Poursuivre la reconquête des axes de vie des poissons migrateurs et consolider le réseau de suivi des populations* ») et **OF 6C** (« *Intégrer la gestion des espèces de la faune et de la flore dans les politiques de gestion de l'eau* »), qui inclut les déclinaisons :

- 6C-01 : « Mettre en œuvre une gestion planifiée du patrimoine piscicole d'eau douce » ;
- 6C-02 : « Gérer les **espèces autochtones** en cohérence avec l'objectif de bon état des milieux ».

Il s'inscrit en cohérence avec les objectifs de conservation (OC) pour le Site Natura 2000 Camargue (SIC FR 9301592 – ZPS FR 9310019), et notamment l'objectif OC 25 : « **Suivi scientifique des habitats et espèce d'intérêt communautaire** ». Ainsi qu'avec la **Charte du Parc naturel régional de Camargue 2011-2022**, et tout particulièrement les articles suivants :

- Article 13 Améliorer la connaissance des dynamiques, des écosystèmes et la surveillance de l'évolution du territoire
 - Article 13.1 Développer des programmes de recherche concertés
 - Article 13.2 Faire de l'Observatoire Camargue l'outil de référence du delta

Le projet cible des milieux où subsistent des espèces de cohérence « Trame Verte et Bleue » listées pour la Région Sud PACA :

- Les espèces de poissons : l'alose feinte du Rhône (*Alosa fallax rhodanensis*), **l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*)**, la bouvière (*Rhodeus amarus*), le brochet (*Esox lucius*) et le spirin (*Alburnoides bipunctatus*).

Le projet inclut deux zones : le bassin du Fumemorte et les Grandes Cabanes Sud (Annexe 1). Le projet répond à une **action prioritaire du plan de gestion des Grandes Cabanes Sud** (ci-après dénommés Grandes Cabanes) dont les objectifs sont de favoriser, sur le long terme, une faune riche et diversifiée, et, à plus court terme, de **rétablir la continuité piscicole vers l'étang du Vaccarès** (Code action 2.7.A, Manceau, N. (coord) 2020a).

Introduction

L'**anguille européenne** (*Anguilla anguilla*) est une espèce migratrice amphihaline qui se reproduit dans l'Océan Atlantique Nord et qui croît dans les eaux continentales européennes et nord-africaines (Figure 1, Annexe 2, Schmidt 1923, Tesch 2003, Miller et al. 2015, 2019). Depuis 2008, l'anguille européenne est classée **critiquement menacée d'extinction** par l'UICN (Union internationale pour la Conservation de la Nature, Pike et al. 2020). En 2024, le recrutement observé en Europe (sans tenir compte de la Mer du Nord) représente seulement 7.2% [4.5-11.5%] du recrutement qui était observé dans les années 1960-79 (ICES and WGEEL 2025).

La reproduction panmictique de cette espèce implique que les efforts de conservation soient coordonnés à l'échelle de son aire de répartition. C'est dans cette perspective que le règlement du conseil européen impose aux Etats membres depuis 2007 l'instauration de plans de gestion pour la sauvegarde de l'anguille européenne (n°1100/2007) (European Council, 2007). Conformément à cette directive, 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 ont comme principal objectif de réduire à long terme les causes anthropiques de mortalité des anguilles, ainsi elles 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 a été 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 des objectifs de suivis du recrutement (stade civelle), du stock en place et de l'échappement (stade argenté, Figure 1).

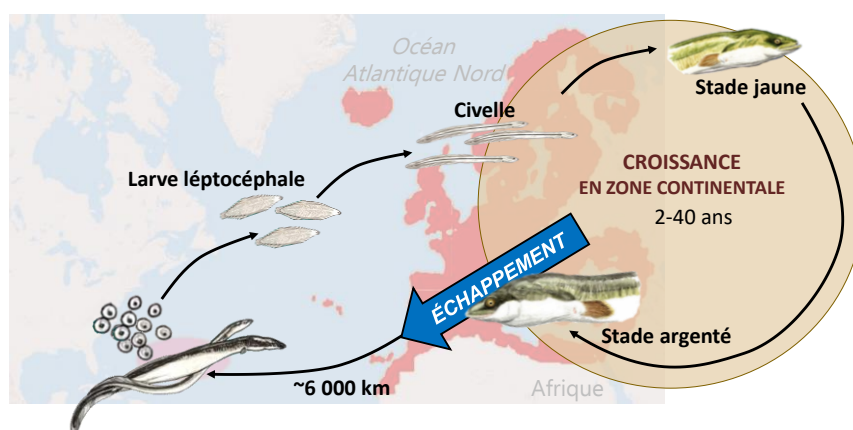


Figure 1 : Cycle de vie de l'anguille européenne qui met en évidence l'étape clé suivie dans le cadre du projet COLAGANG : l'échappement (D'après Tesch 2003, Pujolar et al. 2014, Righton, David et al. 2016, Hoste 2024) © carte de distribution de l'UICN et illustrations de C. Girard.

L'anguille présente un dimorphisme sexuel avec des mâles argentés qui mesurent entre 25 et 48 cm de long (avec une moyenne de 35 à 43 cm), tandis que les femelles atteignent des tailles comprises entre 39 et 130 cm (avec une moyenne de 50 à 61 cm, Acou et al. 2003, Tesch 2003, Durif et al. 2009). L'âge à l'argenture varie également considérablement : de 2 à 15 ans pour les mâles et de 4 à plus de 30 ans pour les femelles (Acou et al. 2003, Tesch 2003, Durif et al. 2009). L'anguille européenne présente des traits d'histoire de vie qui varient en fonction de son habitat de croissance et des conditions environnementales associées. Globalement, plusieurs structurations du peuplement s'observent en fonction d'un gradient latitudinal, à l'échelle de son aire de répartition, et d'un gradient

amont-aval, à l'échelle des bassins versants (Figure 1, Acou et al. 2003, Daverat et al. 2012, Mateo 2017, Teichert et al. 2023). Pour résumer, plus l'anguille grandit dans un habitat au Sud de son aire de répartition, plus son âge à l'argenture est jeune et sa durée de croissance accélérée, en comparaison avec un habitat plus au Nord (Melià et al. 2006, Vélez-Espino and Koops 2010). Une anguille se développant dans un habitat saumâtre a aussi un taux de croissance plus rapide, atteint une taille plus élevée pour un âge donné et est en meilleure condition qu'une anguille ayant grandi en eau douce (Acou et al. 2003, Daverat et al. 2012, Panfili et al. 2022, Teichert et al. 2023, Hoste et al. 2025). Ces milieux, en aval des bassins versants, accueillent une plus forte densité d'anguilles avec un sex-ratio en faveur des mâles (Acou et al. 2003, Daverat et al. 2006, Thibault et al. 2007, Edeline et al. 2009, Teichert et al. 2023). Globalement, l'anguille est présente en plus forte densité dans les habitats côtiers tels qu'estuaires ou lagunes. Les **lagunes méditerranéennes** pourraient même produire jusqu'à près de la moitié du stock reproducteur (Dekker 2003).

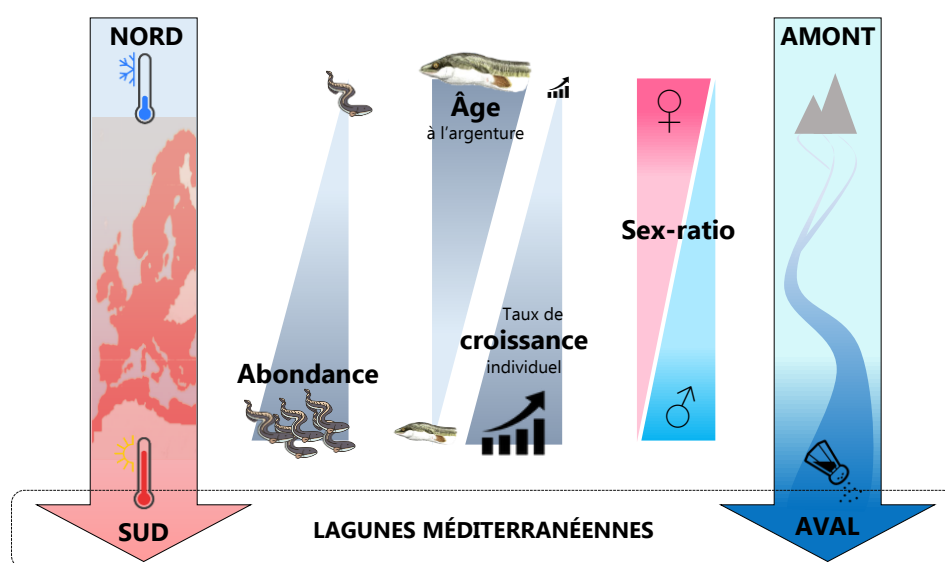


Figure 2 : Variation biogéographique des traits d'histoire de vie (THV) chez l'anguille européenne à l'échelle des aires de distributions (gradient de latitude) et à l'échelle des bassins versants (gradient amont-aval lié à la salinité) (D'après Acou et al. 2003, Daverat et al. 2012, Durif et al. 2020, Bourillon 2021, Teichert et al. 2023, Hoste 2024).

Les systèmes lagunaires sont des milieux dynamiques, qui peuvent être constitués d'une mosaïque d'habitats diversifiés et dont les caractéristiques physico-chimiques et hydrologiques peuvent évoluer drastiquement au cours du temps (Basset et al. 2013). Ce sont des milieux clés pour les populations d'anguilles (Pérez-Ruzafa et al. 2011) en offrant une diversité d'habitats pour leur croissance. La répartition des anguilles à l'intérieur des lagunes et l'occupation des différents types d'habitats (étangs, marais temporaires, canaux, etc.) demeurent encore peu connues (Panfili et al. 2012, Hoste 2024). Différentes stratégies d'utilisation de l'habitat ont été mises en évidence chez l'anguille (Daverat et al. 2006). Les anguilles jaunes adoptent principalement un comportement sédentaire durant leur phase de croissance, mais certaines optent pour un mode de vie nomadique, utilisant différents types de milieux (Daverat and Tomás 2006, Tabouret et al. 2010, Panfili et al. 2012, Hoste 2024). L'analyse microchimique des otolithes réalisée en Camargue a révélé différents comportements écologiques chez l'anguille au cours de sa croissance : tandis qu'une partie des individus ont constamment résidé en eau douce, d'autres ont alterné entre eau douce et eau saumâtre, à différentes fréquences (Panfili et al. 2012, Hoste 2024).

Avant de repartir en mer, l'anguille jaune connaît plusieurs modifications morphologiques et physiologiques qui la préparent à son retour en conditions océaniques, elle devient une anguille argentée (Aroua et al. 2006, van Ginneken et al. 2007). A ce stade, elle va chercher à rejoindre son site de reproduction, c'est la **dévalaison** ou l'**échappement**. Cette migration a lieu principalement par pics en automne voire au début de l'hiver (Ciccotti and Morello 2023). De plus, certaines études ont mis en

évidence un second pic d'échappement au printemps, principalement dans les milieux lagunaires (Ciccotti and Morello 2023, Le Gallou et al. 2025). Ainsi, l'échappement des anguilles varie en fonction de l'habitat et des conditions environnementales. En effet, si ces dernières ne sont pas favorables à la dévalaison, l'anguille pourrait retarder son départ (Vøllestad et al. 1994).

Le déclenchement de l'échappement des anguilles a été associé à diverses variables environnementales, notamment des variables hydrologiques (telles que le débit, la vitesse d'écoulement ou le niveau d'eau), des variables météorologiques (comme les précipitations, la température de l'air et la pression atmosphérique) et la phase lunaire (Vøllestad et al. 1986, Durif and Elie 2008, Sandlund et al. 2017, Ciccotti and Morello 2023, Le Gallou et al. 2025). La majorité des études sur la migration des anguilles argentées ont été réalisées dans des systèmes fluviaux (Ciccotti and Morello 2023). Les pics de dévalaison y sont le plus souvent observés lors d'une augmentation du débit et lorsque les températures de l'eau sont faibles (Vøllestad et al. 1986, Cullen and McCarthy 2003, Besson et al. 2016, Trancart et al. 2017). Dans les milieux lentiques, où les débits sont très faibles, il est plus difficile d'identifier les facteurs qui déclenchent les mouvements migratoires. Dans le lac de Grand-Lieu, la migration des anguilles argentées a été associée à une augmentation du niveau d'eau et à une ouverture des vannes à l'exutoire (Trancart et al. 2017).

Dans les lagunes méditerranéennes, l'échappement est encore peu suivi (Charrier et al. 2012, Ciccotti and Morello 2023, Le Gallou et al. 2025). Dans ces systèmes lagunaires et de marais, les mouvements des masses d'eau peuvent dépendre de nombreux facteurs comme le vent ou la gestion d'ouvrages de connexion (Cataudella et al. 2015). L'accès à la mer peut être indirect et compliqué à trouver, du fait de la mosaïque d'habitats variés et de la présence d'obstacles. Afin d'adopter les mesures de gestion qui permettraient d'optimiser le retour en mer des anguilles argentées, il est nécessaire d'identifier les périodes les plus favorables et l'influence de paramètres environnementaux qui permettraient d'anticiper les forts pics d'échappement, les voies de passage privilégiées, ainsi que les potentiels obstacles à la migration.

L'hydrosystème du Vaccarès est situé à l'intérieur de l'île de la Camargue, entre les deux bras du Rhône endigués, au cœur du delta de Camargue. La connectivité hydrologique entre le Rhône et son delta repose sur le fonctionnement d'un vaste réseau de prises d'eau et de stations de pompage réparties le long des digues. L'île de la Camargue est constituée de plusieurs bassins hydrographiques qui bénéficient chacun d'un réseau d'irrigation alimenté essentiellement par un système de pompage au Rhône. La plupart de ces bassins sont poldérisés, c'est-à-dire que les eaux de drainage sont repompées au Rhône (Figure 3). Ces configurations peuvent être problématiques pour la circulation de la faune aquatique, qui peut être pompée depuis le Rhône (Poizat et al. 1999) et se retrouver piégée dans un système sans voie d'issue. L'anguille est notamment susceptible d'être affectée, pouvant facilement être recrutée *via* les prises d'eau (dont les systèmes de pompage) au stade civelle ou anguillette et se retrouver bloquée notamment lorsqu'elle cherche à regagner la mer au stade argenté. En effet, au stade argenté, l'anguille ne devrait pas être en mesure de rejoindre les stations de pompage pour l'irrigation, et n'est pas susceptible de survivre au passage par les stations de pompage pour le drainage (Lambremon and Rivoallan 2022). A l'échelle de l'île de la Camargue, les surfaces des bassins versants poldérisés étant conséquentes (40%, Allouche et al. 2015), une part considérable des futurs reproducteurs est suspectée être retenue et ainsi ne pas pouvoir contribuer au stock reproducteur.

Objectifs

Le projet COLAGANG a visé à améliorer les connaissances concernant la démographie, la phénologie et les déplacements migratoires de deux sous-populations d'anguille camarguaises associées à deux bassins dominés par l'eau douce, localisées en amont de l'étang du Vaccarès : le **bassin du Fumemorte** et le **bassin des Grandes Cabanes**.

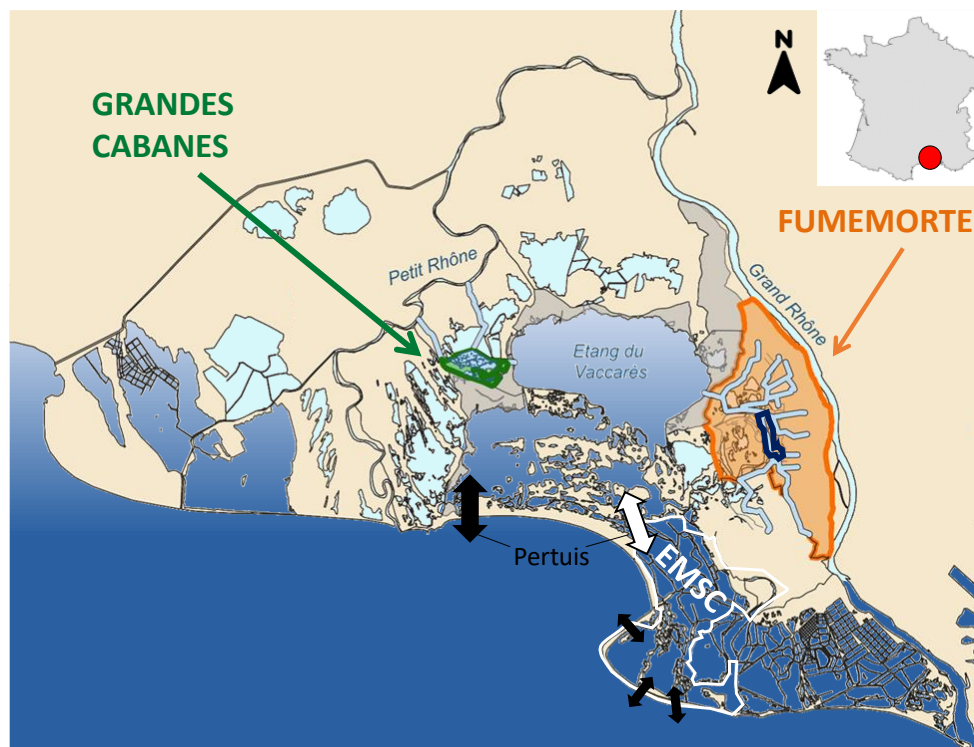


Figure 3 : Localisation des deux bassins étudiés à l'intérieur du delta de Camargue. Les eaux des bassins en gris s'écoulent gravitairement dans l'étang du Vaccarès, alors que les autres bassins entre les deux bras du Rhône (Petit et Grand Rhône) sont poldérisés. Le polygone bleu foncé montre la portion du canal du Fumemorte où les anguilles sont capturées et marquées. Les flèches noires indiquent les connexions à la mer. La principale connexion à la mer du système, à l'Ouest de l'île camarguaise, est barrée par le pertuis de la Fourcade. La flèche blanche représente le pertuis de la Comtesse, un ouvrage de connexion entre l'hydrosystème du Vaccarès et les étangs et marais des Salins de Camargue (EMSC), qui sont connectés au Sud à la mer en plusieurs endroits, de manière permanente ou temporaire.

➔ Objectif 1 : Étudier le devenir des anguilles dans les bassins poldérisés

Tandis que le bassin du Fumemorte est l'un des rares bassins connectés à l'étang du Vaccarès, le bassin des Grandes Cabanes Sud (Grandes Cabanes) était déconnecté depuis plusieurs décennies (Figure 3). Au début du projet, le système des Grandes Cabanes était considéré avec une circulation en vase clos. Un inventaire piscicole effectué en 2018 avait mis en évidence un enjeu sur les populations de poissons, notamment au regard des anguilles présentes sur le site et qui semblaient ne pas pouvoir s'échapper du système (MRE and Naturalia 2018).

Initialement, le projet COLAGANG a eu pour objectif d'étudier l'impact des systèmes camarguais poldérisés sur le devenir des anguilles. Il devait être étudié si les anguilles argentées produites par le bassin des Grandes Cabanes, alors poldérisé, cherchaient à emprunter la voie d'alimentation au Rhône pour retourner en mer, ou si elles s'échappaient par le canal de l'ASA de la Sigoulette qui draine ce système.

➔ Objectif 2 : Evaluer un projet de reconnexion hydrobiologique entre Petit Rhône et étang du Vaccarès

Une étude avait été réalisée en 2022 afin de proposer et d'évaluer techniquement et financièrement des scénarii de reconnexion du site des Grandes Cabanes à l'étang du Vaccarès dans le but de restaurer les continuités hydrobiologiques du site : c'est-à-dire d'un point de vue de la faune aquatique mais également du réseau hydraulique. D'autant plus que les gestionnaires de l'étang du Vaccarès étaient à la recherche d'apport en eau douce de bonne qualité (sans intrant chimique). La reconnexion des Grandes Cabanes à l'étang du Vaccarès a été réalisée en juin 2023.

Le projet COLAGANG a évalué le succès de ce projet de restauration de continuité écologique innovant entre fleuve, marais endigué et masse d'eau de transition : entre le Petit Rhône, le bassin des Grandes Cabanes et l'étang du Vaccarès.

➔ **Objectif 3 : Étudier la dynamique d'échappement : période, synchronisme et facteurs environnementaux impliqués**

Enfin, ce projet a eu pour objectif d'identifier les périodes et les facteurs environnementaux impliqués dans le processus d'échappement. Disposer du même type de suivis entre deux bassins hydrographiques localisés à l'Est (Fumemorte) et l'Ouest (Grandes Cabanes) de l'étang du Vaccarès constituait (et continue à constituer) une opportunité unique pour étudier la connectivité à l'intérieur d'un système lagunaire, entre canaux, marais et étangs.

➔ **Objectif 4 : Déterminer les voies d'échappement privilégiées**

La télémétrie RFID couplée à la télémétrie acoustique a visé à mieux appréhender quelles voies d'échappement sont privilégiées par les anguilles argentées pour retourner en mer. Une fois dans l'étang du Vaccarès, à l'aval des deux bassins étudiés, les anguilles argentées ont deux possibilités pour rejoindre la mer (Figure 3): soit en passant par le pertuis de la Fourcade, soit en passant par le pertuis de la Comtesse puis les étangs et salins des marais de Camargue (EMSC). Les anguilles du bassin des Grandes Cabanes pourraient également décider de remonter le canal d'alimentation et rejoindre la mer *via* le petit Rhône.

Ce rapport est structuré notamment en fonction des actions mises en place pour répondre aux différents objectifs. Après avoir présenté le fonctionnement des deux sites étudiés et le contexte climatique, les points suivants seront développés et finalement discutés :

- ⇒ **QUI ? Caractérisation de la structure démographique des 2 sous-populations d'anguilles**
- ⇒ **QUAND ? Détermination de la période d'échappement par télémétrie RFID**
- ⇒ **SOUS QUELLE INFLUENCE ? Influence de facteurs environnementaux sur les pics d'échappement**
- ⇒ **PAR OÙ ? Identification des voies d'échappement privilégiées**

Présentation des sites d'étude : Fonctionnement hydrologique & voies d'échappement

L'hydrosystème du Vaccarès regroupe l'étang du Vaccarès et les étangs inférieurs (localisés entre l'étang du Vaccarès et la mer), ainsi que les bassins qui y sont connectés. La principale connexion entre la mer et cet hydrosystème est un canal étroit, barré par 13 martelières, le Pertuis de la Fourcade, localisé sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer au sud-ouest du delta (Figure 3, Annexe 3). Depuis 2011, d'autres connexions à la mer, permanentes ou temporaires, existent dans la partie sud-est du delta à travers les étangs et marais des salins de Camargue (EMSC, Figure 3). Les EMSC sont connectés à l'hydrosystème du Vaccarès au travers du Pertuis de la Comtesse, un autre ouvrage composé de 13 vannes (Annexe 3).

Canal du Fumemorte

Le bassin du Fumemorte a une superficie de 68 km² et est principalement alimenté par l'eau douce du Grand Rhône par pompage (Annexe 1). Ce bassin est principalement drainé par le canal de l'ASA (Association Syndicale Autorisée) du Fumemorte (ci-après dénommé canal du Fumemorte) qui s'étend sur environ 14 km de long. Ce canal collecte les eaux d'un réseau de fossés et de canaux de près de 400 km de long (Chauvelon 1998, Boutron et al. 2021). Le canal du Fumemorte constitue actuellement le principal apport d'eau douce de l'étang du Vaccarès. Depuis 2012, suite à la destruction d'un barrage à sel endommagé, les eaux mésohalines à euhalines de l'étang du Vaccarès peuvent remonter épisodiquement le canal sur plusieurs kilomètres, notamment par temps de mistral. Cependant, le canal reste principalement un environnement d'eau douce, avec une salinité moyenne de 4 g/L (données provenant d'une sonde placée au pont des Garcines).

Principalement utilisé pour les grandes cultures, le bassin est soumis à une forte contamination d'origine agricole (Cheiron, A. (Coord.) 2018, Munaron, D. et al. 2020). Il est question de le poldériser, en interrompant, au moins saisonnièrement, sa connexion avec l'étang du Vaccarès (Annexe 1).

Ce canal, en permanence en eau, est directement relié à l'étang du Vaccarès. À son embouchure, la migration bidirectionnelle des organismes aquatiques est possible. Le recrutement en jeunes anguilles (civelles ou anguillettes) se fait principalement *via* l'étang du Vaccarès, depuis l'une des connexions à la mer (pertuis de la Fourcade ou EMSC et pertuis de la Comtesse), mais de jeunes individus peuvent également être recrutés *via* le pompage au Rhône (Figure 4). En revanche, il paraît impossible pour les anguilles devenues argentées de rejoindre le Rhône *via* les stations de pompage. La seule voie d'échappement identifiée consiste à emprunter l'étang du Vaccarès puis à rejoindre l'une des connexions à la mer (Figure 4).

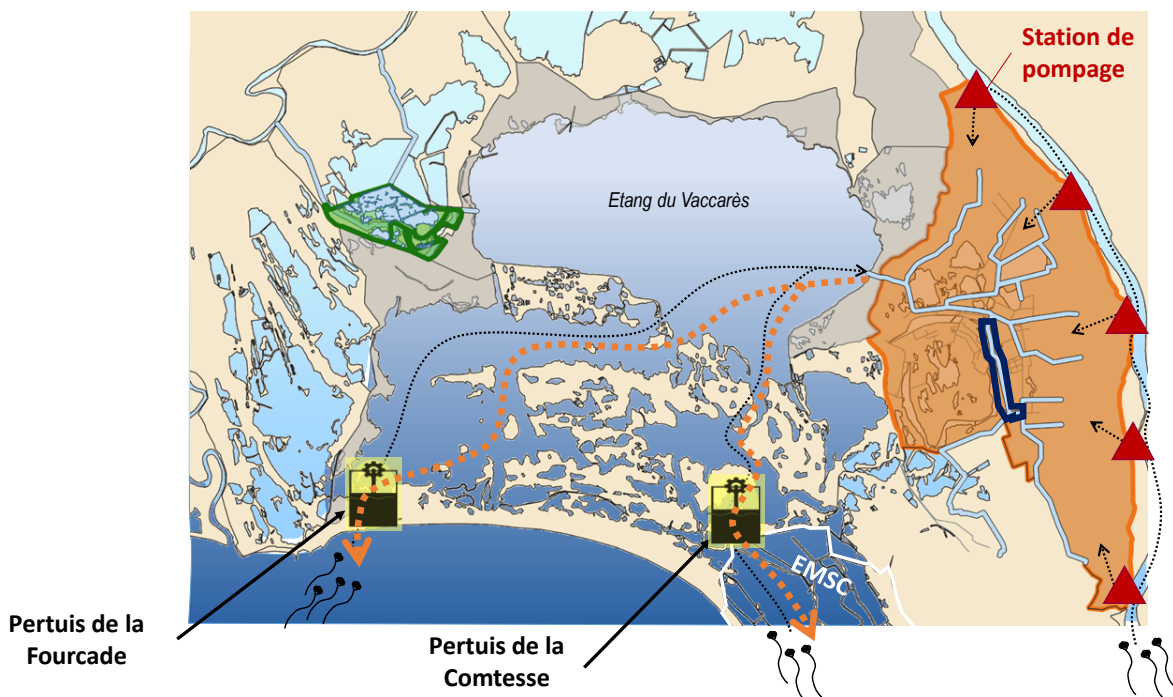


Figure 4 : Fonctionnement hydrologique du bassin du Fumemorte (polygone orange) et voies de recrutement au stade civille (en noir pointillés) et d'échappement au stade argenté (en orange pointillés) pour l'anguille européenne dans le canal du Fumemorte (tracé bleu clair).

Bassin des Grandes Cabanes

Le domaine des Grandes Cabanes est un bassin d'une superficie de 4.7 km², peu profond et composé de marais et de canaux oligohalins à mésohalins interconnectés. Ce territoire appartient au Conservatoire du littoral et est géré par l'Office français de la biodiversité (OFB). Conformément à l'article L. 322-1 du code de l'environnement, la gestion du site des Grandes Cabanes a pour objectifs la protection du patrimoine naturel et le respect des équilibres écologiques (Annexe 1). En concertation avec le Conservatoire du littoral, l'OFB met en œuvre sur ce territoire un modèle de gestion de protection du patrimoine naturel et de respect des équilibres écologiques en conciliant la préservation de zones humides avec une gestion cynégétique durable.

Ce système est l'un des rares bassins à bénéficier d'une alimentation en eau douce provenant directement du Petit Rhône *via* le canal de la Pigeonnière (Figure 5). La connexion au Petit Rhône est équipée de deux vannes et d'une station de pompage, qui n'est cependant que très rarement utilisée et qui n'a jamais été actionnée durant la durée du projet COLAGANG, l'écoulement fonctionnant en permanence en gravitaire. En cas de crue du Rhône, les vannes doivent être fermées afin de garantir la sécurité de la digue. Le canal de la Pigeonnière alimente ensuite toutes les unités hydrauliques du site des Grandes Cabanes.

Jusqu'en juin 2023, ce bassin était drainé gravitairement par le canal de l'ASA de la Sigoulette au travers de deux ouvrages (un clapet anti-retour et une vanne de type martelière, Figure 5A). Le drainage des eaux du canal de la Sigoulette se faisait ensuite par pompage vers le Petit Rhône. En juin 2023, des travaux ont été réalisés afin de reconnecter directement le site des Grandes Cabanes à l'étang du Vaccarès (Figure 5B). Depuis, le drainage *via* le canal de l'ASA de la Sigoulette ne devait plus être utilisé mais s'est avéré nécessaire lorsque que le niveau de l'étang du Vaccarès était trop haut (saison 2024-2025).

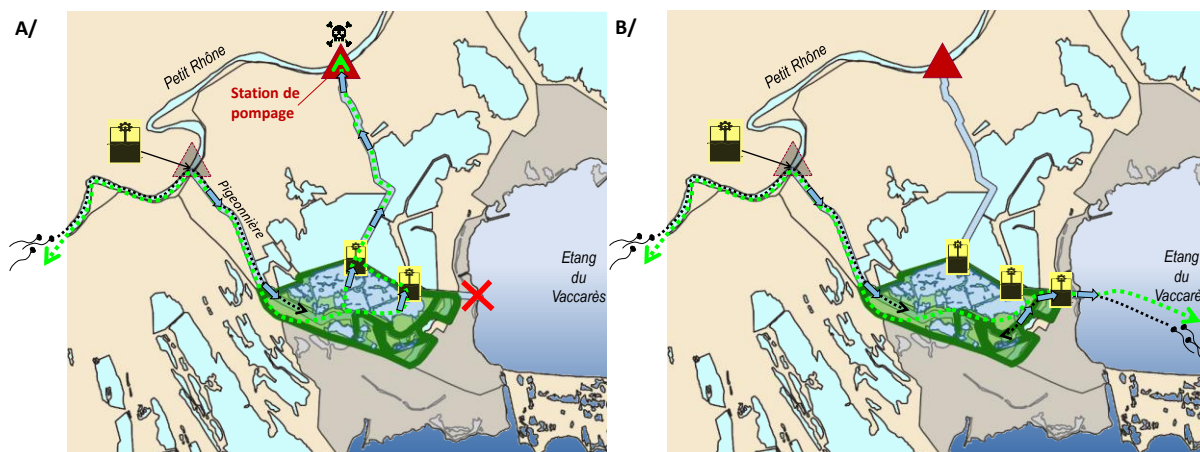


Figure 5 : Fonctionnement hydrologique du bassin des Grandes Cabanes (polygone vert foncé) et voies de recrutement au stade civelle (en noir pointillés) et d'échappement au stade argenté (en vert pointillés) pour l'anguille européenne, A/ avant, et B/ après les travaux de restauration de la connexion avec l'étang du Vaccarès réalisés en juin 2023. Les flèches bleues indiquent le sens des écoulements gravitaires de l'eau.

Jusqu'à l'automne 2022, le site des Grandes Cabanes était colonisé par l'anguille uniquement *via* la prise d'eau gravitaire au Petit Rhône (Figure 5a). Au stade argenté, les individus qui s'échappaient du système *via* le canal de l'ASA de la Sigoulette étaient alors supposés se retrouver piégés. En raison du plan de sauvegarde du Vaccarès (Ricque et al. 2025), en manque significatif d'eau douce, le canal de l'ASA de la Sigoulette a été reconnecté à plusieurs reprises à l'étang du Vaccarès dès l'automne 2022 (Figure 6). Cette reconnexion a permis d'ouvrir une nouvelle voie d'échappement potentielle vers l'étang du Vaccarès (Figure 6).



Figure 6 : Ecoulement ponctuel des eaux du canal de l'ASA de la Sigoulette en direction de l'étang du Vaccarès depuis l'automne 2022 dans le cadre du plan de sauvegarde de l'étang du Vaccarès, et nouvelle voie d'échappement potentielle pour les anguilles argentées des Grandes Cabanes (pointillés en vert). © Géoportail.

Depuis juin 2023, suite aux travaux de reconnexion avec l'étang du Vaccarès, le recrutement en jeunes anguilles peut se faire depuis l'amont, *via* la connexion au Petit Rhône, ou depuis l'aval, *via* l'étang du Vaccarès (Figure 5b). De même, au stade argenté, les anguilles peuvent chercher à s'échapper en remontant le canal d'alimentation *via* le Petit Rhône, ou en se dirigeant dans l'étang du Vaccarès (Figure 7) et en cherchant un des chemins débouchant à l'une des connexions à la mer (Figure 5b et Figure 3).

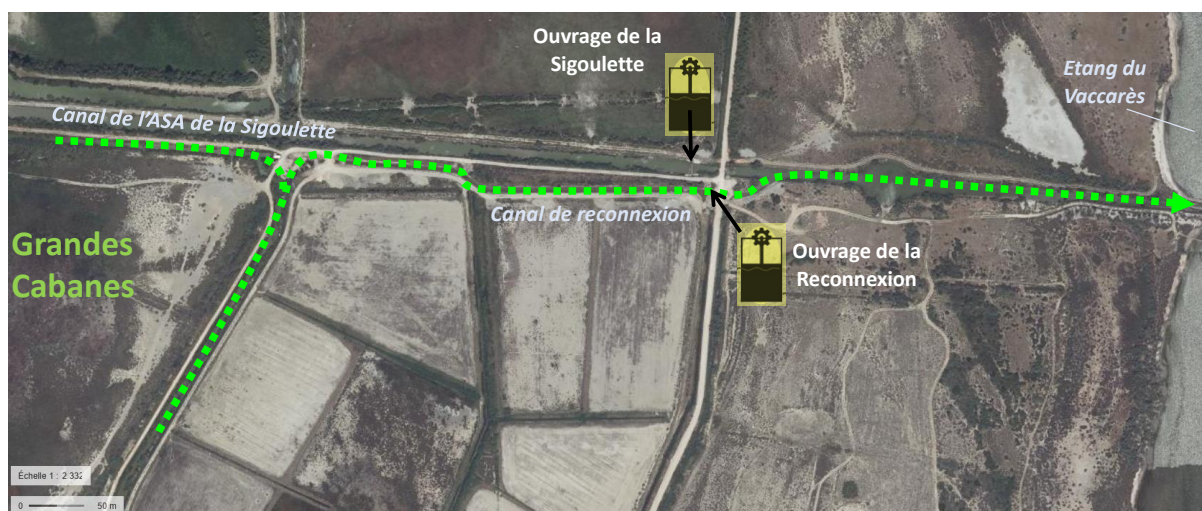


Figure 7 : Ecoulement des eaux en direction de l'étang du Vaccarès après les travaux de restauration de la connexion entre les Grandes Cabanes et l'étang du Vaccarès, et nouvelle voie d'échappement potentielle pour les anguilles argentées des Grandes Cabanes (pointillés en vert). © Géoportail.

A l'intérieur du site des Grandes Cabanes, une vingtaine d'ouvrages de connexion entre les différentes unités hydrauliques sont régulièrement manipulés par les gestionnaires en fonction de l'évolution des conditions environnementales et des mesures de gestion appliquées (Figure A41). Un résumé des manipulations des ouvrages clés est présenté en Annexe 3.

Contexte climatique

Influencée par un climat méditerranéen, la Camargue connaît des températures et une évaporation élevée pendant la saison estivale, ce qui entraîne une réduction des niveaux d'eau et une augmentation des salinités, en particulier dans la partie méridionale du delta. Cependant, en raison de l'irrigation intensive lors de la saison sèche, d'avril à août, la Camargue reçoit un afflux substantiel d'eau douce, en particulier dans la partie nord, provenant principalement d'activités agricoles telles que la riziculture (Chauvelon 1998, Blondel et al. 2019). En général, pendant les mois d'hiver, lorsque le climat est doux et humide, les niveaux d'eau augmentent et la salinité diminue. En effet, la période la plus pluvieuse, comprise entre septembre et janvier, représente en moyenne 57 % des précipitations annuelles (Blondel et al. 2019). Par conséquent, les niveaux de salinité les plus élevés sont généralement observés à la fin de la saison estivale. Le principal moteur de la circulation des eaux en Camargue reste le vent (Boutron et al. 2021), dont les régimes dominants sont le mistral (vent de nord-ouest) et le vent de secteur sud-est (Figure A49).

Depuis 2017, plusieurs années sèches se sont succédées, dont les premières années du projet COLAGANG, de 2021 à 2023 (Figure 8). Sur les quinze dernières années, les températures moyennes annuelles tendent en effet à augmenter, tandis que le cumul des précipitations tend à diminuer (Figure 8). L'année 2024 a été l'année la plus humide du projet, marquée en particulier par un printemps très pluvieux (Figure A51).

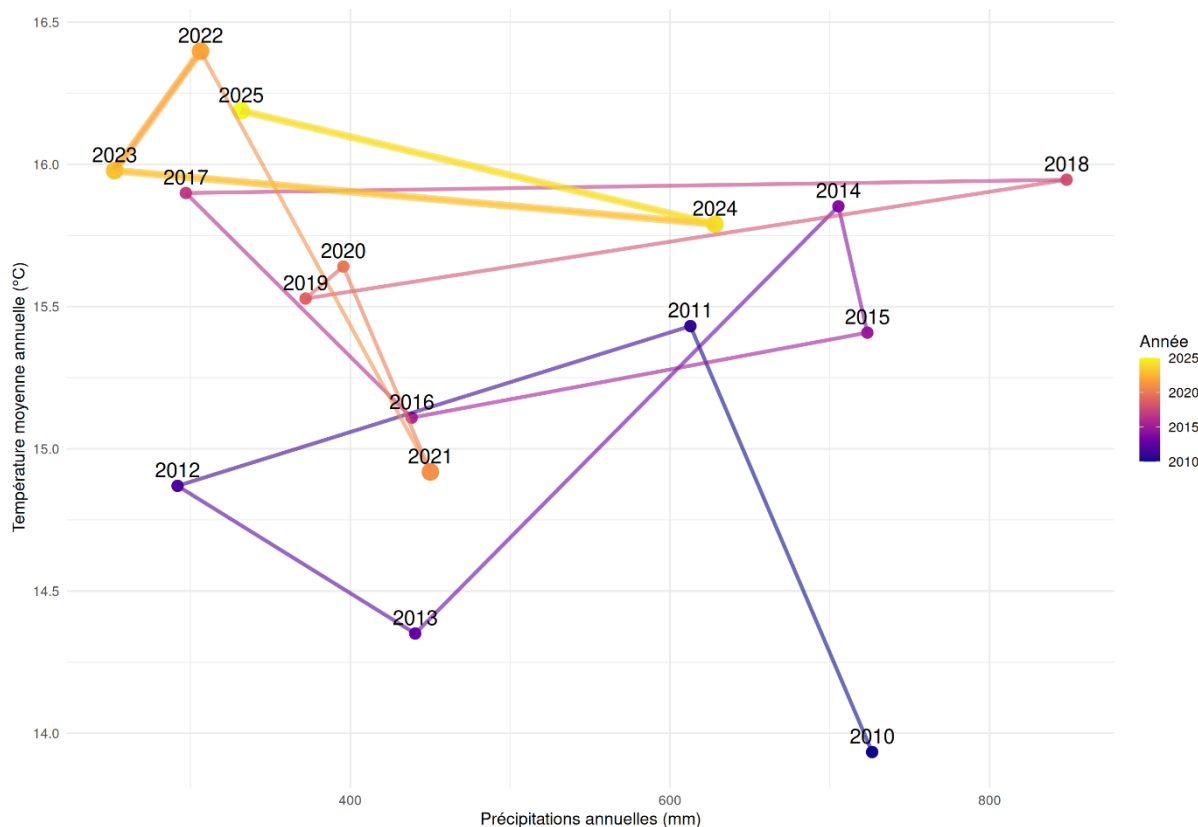


Figure 8 : Evolution des conditions climatiques par an depuis 2010, c'est-à-dire la moyenne des températures de l'air (°C) en fonction des précipitations (mm) par année. Source des données : Météo France, station de la Tour du Valat.

Depuis 2016, une augmentation significative de la salinité a été enregistrée dans les lagunes (Boutron et al. 2021). Cette salinisation des milieux est un enjeu majeur en Camargue impactant à la fois les activités humaines (par ex., l'agriculture) mais également les assemblages biologiques. En 2022, constatant que le système du Vaccarès était en état de crise, un plan de sauvegarde a été lancé afin de trouver des solutions pour l'approvisionner davantage en eau douce (Ricque et al. 2025).

Caractérisation de la structure démographique des 2 sous-populations d'anguilles

Dans le but de caractériser les peuplements d'anguilles associés au bassin des Grandes Cabanes et au canal du Fumemorte, un suivi en capture-marquage-recapture (CMR) a été mis en place. Le marquage des individus permet d'obtenir des données qui sont indispensables pour étudier la dynamique d'une population (par ex., les taux de survie, les taux de transition entre stades de développement et les abondances) et suivre l'évolution de la condition et de la croissance des individus. Le marquage permet également de mettre en place des suivis par télémétrie et d'étudier le déplacement des individus. Le suivi des individus au stade indifférencié ou jaune permet d'étudier leur stratégie d'utilisation des habitats pendant leur croissance, et d'évaluer à l'échelle du bassin le taux de sédentarité. Au stade argenté, le marquage permet d'étudier la dynamique d'échappement et les voies empruntées.

Capture des anguilles

Les campagnes de pêche dédiées à la capture et au marquage des anguilles sont réalisées entre octobre et avril, lorsque les températures de l'eau sont inférieures à 16°C pour limiter les risques

d'infection. Ainsi, une année de suivi (ou saison) est définie de septembre de l'année t à août de l'année $t+1$. Ces campagnes de pêches scientifiques sont soumises à autorisation préfectorale (Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône). La pêche aux engins passifs est utilisée sur les deux sites étudiés, tandis que la pêche électrique est uniquement réalisée sur le domaine des Grandes Cabanes (Annexe 5).

Dans le canal du Fumemorte, une semaine par mois toute l'année, deux stations sont équipées chacune de deux verveux, dans le cadre d'un suivi du peuplement piscicole mené sur le long terme (la station 1 depuis 1993 et la station 2 depuis 2013, Figure 9 et Annexe 5). Entre octobre et avril, davantage de stations sont équipées pendant, au moins, une semaine supplémentaire de manière à augmenter l'effort de capture des anguilles (Figure 9).

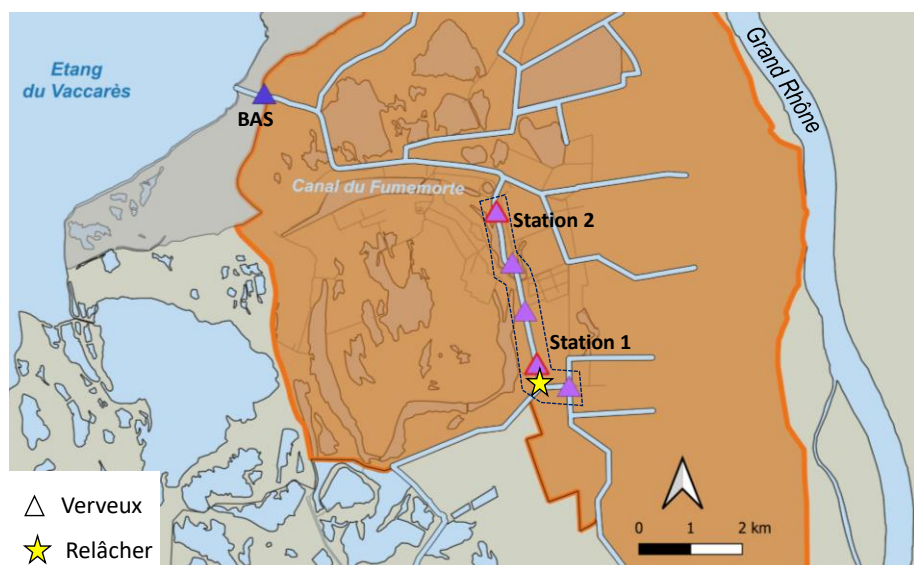


Figure 9 : Localisation des stations d'échantillonnage dans le canal du Fumemorte. Les stations 1 et 2 sont échantillonnées au moins 4 jours consécutifs par mois. Des stations additionnelles au sein du polygone en pointillé sont utilisées pendant la période propice au marquage d'anguilles pour tenter de capturer davantage d'individus. La station du Barrage à sel (BAS) est utilisée pour capturer les individus qui cherchent à s'échapper du bassin du Fumemorte. L'étoile symbolise le site de relâcher des individus marqués.

Dans le bassin des Grandes Cabanes, une semaine de pêche est menée aux mois d'octobre, novembre, mars et avril depuis octobre 2021, à l'aide de filets, soit 4 jours consécutifs de pêche effectifs. Une capêchade est déployée dans le marais de la Tortue et un total de neuf verveux sont mis en place dans le canal de la Pigeonnière ou dans des bras étroits des marais de la Berezina et de Costières (Figure 10). De plus, le lundi, premier jour de la campagne de pêche, une journée de pêche électrique est réalisée par des agents habilités de l'OFB du service régional connaissance Sud-PACA et du service départemental des Bouches-du-Rhône sur 4 stations (Figure 10). Davantage d'informations sur la mise en place des filets et l'effort de pêche sont fournies en Annexe 5.

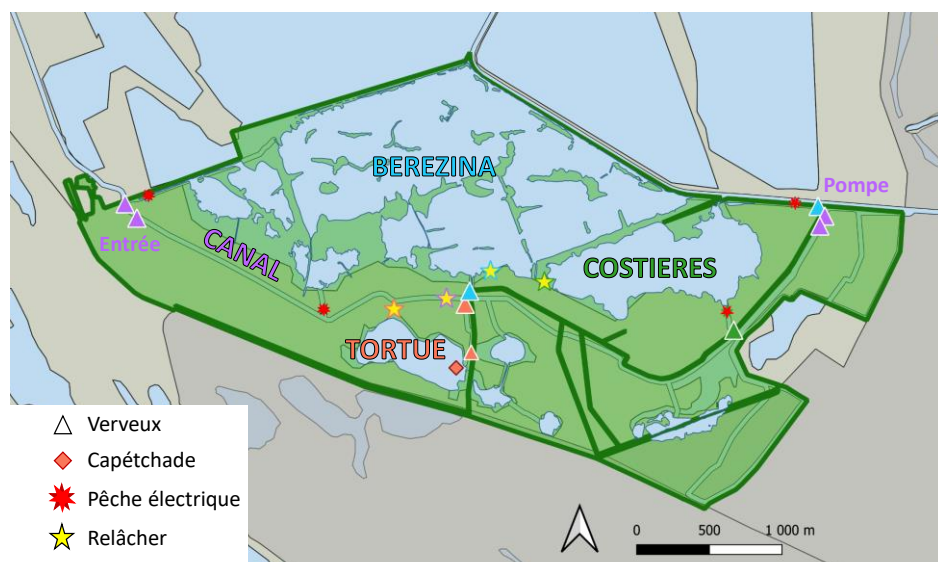


Figure 10 : Localisation des sites de capture en fonction de la méthode utilisée (verveux, capéchéade ou pêche électrique) et localisation des sites de relâcher des anguilles dans le bassin des Grandes cabanes. Les couleurs correspondent aux différentes unités hydrauliques échantillonnées. Les individus sont relâchés à des sites (étoiles) qui appartiennent à la même unité hydraulique que leur site de capture.

La réalisation des campagnes de pêche est, de plus, une opportunité de réaliser un inventaire des espèces aquatiques en présence. Les inventaires par site d'échantillonnage sont fournis en Annexe 6.

Abondance des captures

Les quatre années de suivi ont montré un peuplement d'anguilles toujours plus abondant dans le bassin des Grandes cabanes que celui du canal du Fumemorte, et ce davantage encore la saison 2023-2024 (Figure 11). Dans le bassin des Grandes cabanes, d'octobre 2021 à avril 2024, un total de 5078 anguilles ont été capturées, dont 271 en pêche électrique (soit 5.3% des captures, Tableau A6). Alors que dans le canal du Fumemorte, durant la même période, seulement 1277 anguilles ont été capturées (Tableau A7). La présence d'habitats plus diversifiés dans le bassin des Grandes Cabanes, avec notamment des marais végétalisés, pourrait être un élément de réponse à cette différence marquée en termes d'abondance d'anguilles entre les deux sites d'étude.

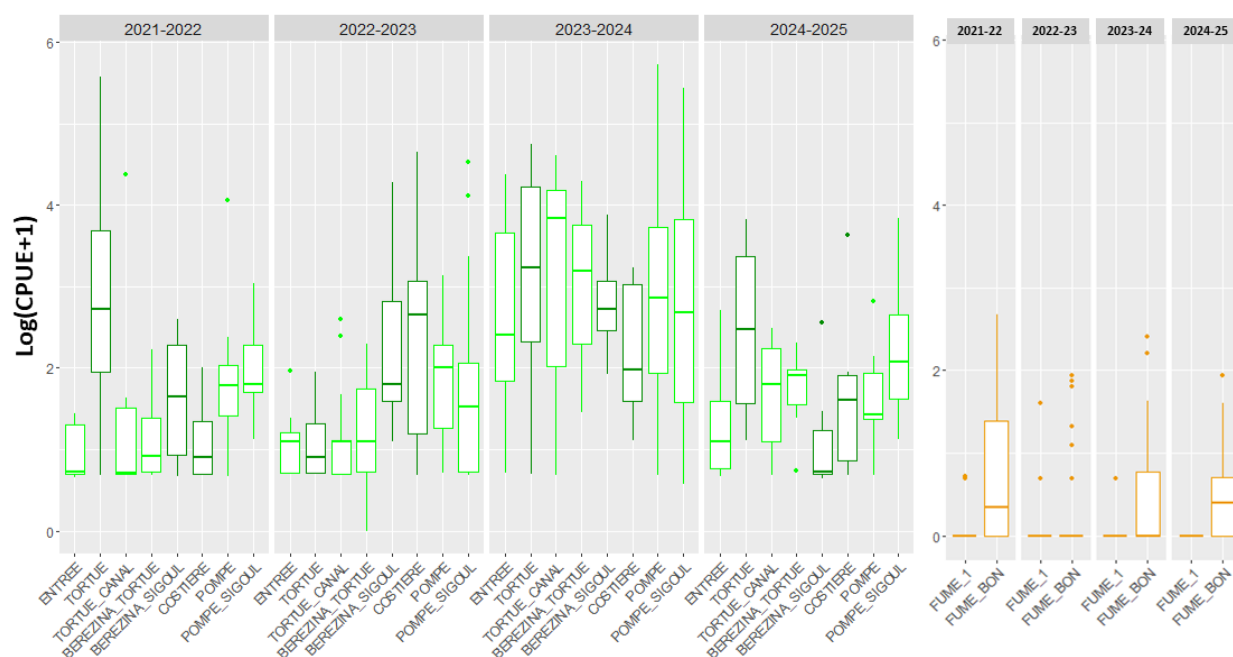


Figure 11 : Boxplots représentant les captures totales d’anguilles exprimées en CPUE (capture par unité d’effort de pêche, ici 24h) log-transformées par station d’échantillonnage au filet (verveux ou, seulement pour la station Tortue, capéchade) pour un effort de pêche de 4 jours consécutifs aux mois d’octobre, novembre, mars et avril, depuis octobre 2021. Les résultats sont présentés par saison de pêche - d’octobre de l’année t à avril de l’année $t+1$ – en dissociant les stations des Grandes Cabanes (en vert) de celles du Fumemorte (en orange).

Sex-ratio

D’octobre 2021 à avril 2025, un total de 716 anguilles argentées ont été capturées dans le bassin des Grandes Cabanes dont 613 (soit 86%) étaient des femelles (Figure 12). Dans le canal du Fumemorte, sur les 148 anguilles argentées capturées, 136 (soit 92%) étaient des femelles. Ces résultats sont cohérents avec les précédentes études qui ont montré que dans les habitats dominés par l’eau douce, ce sont essentiellement des anguilles argentées femelles qui sont produites (Acou et al. 2003).

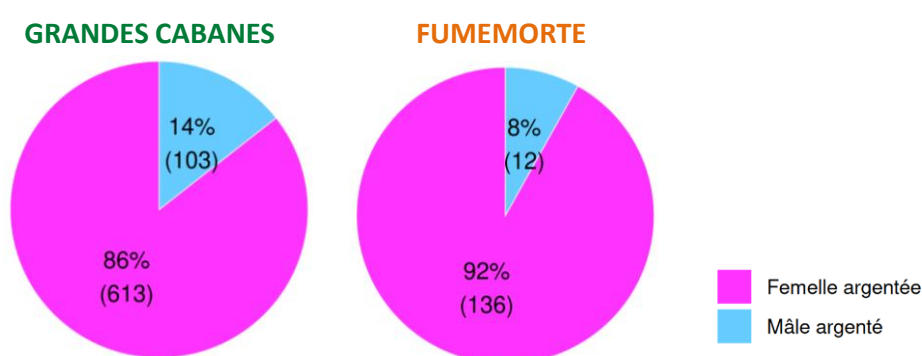


Figure 12 : Sex-ratio des anguilles argentées échantillonnées par site d’octobre 2021 à avril 2025

Âge à l’argenteure

En 2022, le stage de Master 2 de Hugo Vey Payre, co-encadré par l’OFB, la Tour du Valat et le CEFREM/Perpignan Université, a permis de déterminer l’âge et les taux de croissance de 198 individus par otolithométrie (Vey-Payre 2022). Ces individus avaient été prélevés durant l’automne 2021 (Annexe 7).

L'hypothèse testée était que les anguilles argentées sont plus âgées dans les systèmes dits poldérisés (donc fermés) comme le canal de l'ASA de la Sigoulette que dans les systèmes dits ouverts comme le canal du Fumemorte ou l'étang du Vaccarès. Les résultats de cette étude n'ont pas soutenu cette hypothèse. En effet, les anguilles femelles argentées du bassin des Grandes cabanes avaient, en moyenne, un âge à l'argenture significativement plus jeune que celles des anguilles du canal du Fumemorte (6 ans pour 18 individus et 10 ans pour 27 individus, respectivement, Figure 13). De plus, l'âge moyen des anguilles femelles argentées du bassin des Grandes Cabanes n'était significativement pas différent de celui des individus capturés dans l'étang du Vaccarès (4 ans, n=55). Ce résultat ne permet pas d'indiquer que les anguilles argentées femelles du bassin des Grandes Cabanes avaient une forte probabilité de rester piégées à l'intérieur de ce site. Il était toutefois possible qu'elles cherchaient à s'échapper par le canal de l'ASA de la Sigoulette, où cette fois elles se retrouvaient peut-être piégées (du moins jusqu'à l'automne 2022). Cela pourrait expliquer pourquoi les anguilles argentées femelles du canal de l'ASA de la Sigoulette avaient, en moyenne, un âge significativement plus élevé (8 ans, n=15) que celui des individus capturés dans le bassin des Grandes Cabanes.

Par ailleurs, les anguilles grandissent plus lentement dans les milieux d'eau douce qu'en milieux salés (Melià et al. 2006, Daverat et al. 2012, Teichert et al. 2023). Nos résultats corroborent avec de précédentes études qui ont mis en évidence des taux de croissance individuels plus importants chez les anguilles de l'étang du Vaccarès que chez celles du canal du Fumemorte (Vey-Payre 2022).

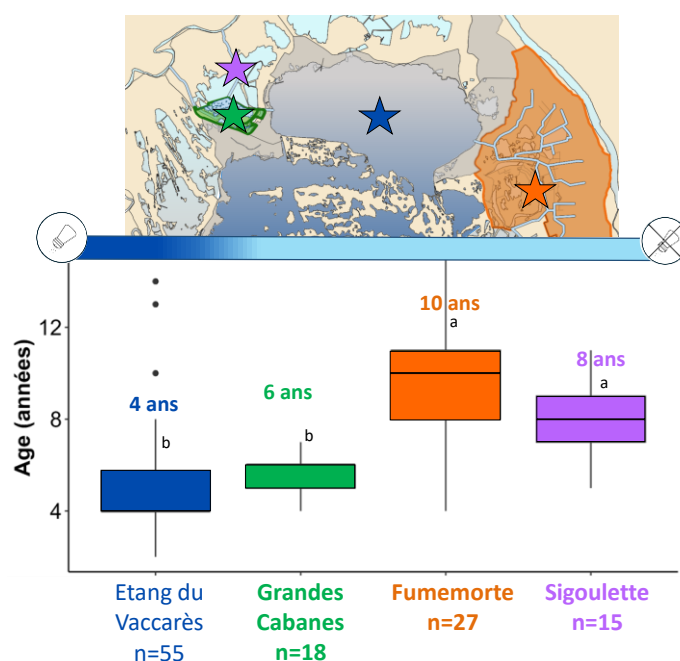


Figure 13 : Âge déterminé par otolithométrie pour des anguilles argentées femelles prélevées dans 4 sites de l'île de Camargue durant l'automne 2021

Marquage

Toutes les anguilles capturées sont acheminées au stand de biométrie, où elles sont traitées selon un protocole préalablement défini (Annexe 8). Tous les individus de plus de 18 cm (et plus de 15 g) sont marqués avec un transpondeur inerte, à durée de vie illimitée. Lorsque le transpondeur est activé par un champ électromagnétique, son numéro unique peut être lue et enregistré. Ainsi, lors d'une éventuelle recapture, un individu marqué peut être reconnu et identifié. Les individus ayant une longueur inférieure à 30 cm (et/ou un poids inférieur à 40 g) sont marqués avec des transpondeurs de 12 mm de long en intramusculaire. Les individus plus grands et en bonne condition sont marqués avec des transpondeurs de 23 mm de long par laparotomie.

Le marquage des individus se fait dans le cadre d'une procédure expérimentale qui est validée en amont par un comité d'éthique et autorisée par le ministère de la Recherche, et ne peut être mise en œuvre que par du personnel spécifiquement qualifié. Dans le cadre du projet COLAGANG, deux agents OFB et deux agents de la Tour du Valat ont pu obtenir leurs diplômes en expérimentation de la faune sauvage et en chirurgie animale.

Par an, jusqu'à 350 individus ont été autorisés à être marqués avec des transpondeurs de 23 mm de long pour le canal du Fumemorte (procédure expérimentale #30180), et 450 pour la première année de suivi puis 350 pour le bassin des Grandes Cabanes (#32274). Un avenant a été obtenu pendant l'été 2024, afin d'augmenter le nombre d'animaux utilisés à 800 par an aux Grandes Cabanes, car le quota d'individus à marquer a presque été atteint au printemps 2024.

Le bilan des captures, du marquage et des recaptures est présenté en Annexe 8 (Tableau A6 et Tableau A7). Dans les deux bassins étudiés, la majorité des individus marqués en 23 mm correspond à des femelles (n=1516 soit 67.5% des individus marqués en 23 mm pour les Grandes Cabanes et n=915 soit 69% pour le Fumemorte – depuis 2018, Figure 14). Ces individus sont majoritairement au stade jaune (respectivement 72% et 76.3%). Un total de 102 mâles argentés a été capturé dans le bassin des Grandes Cabanes, dont 50 durant la saison 2023-2024. Et un total de 54 mâles a été marqué dans le canal du Fumemorte depuis 2018, et seulement 12 depuis octobre 2021.

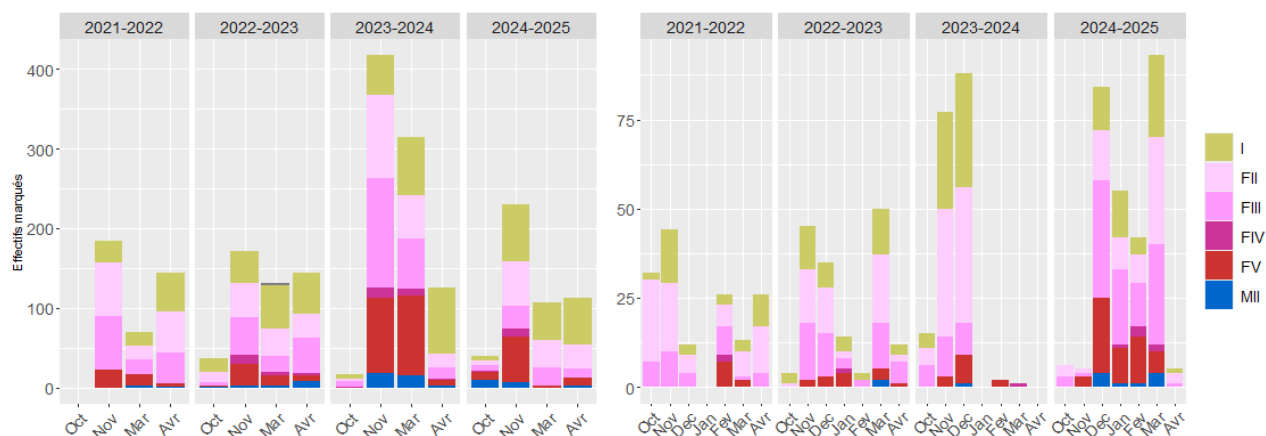


Figure 14 : Nombre d'individus marqués en 23 mm par mois aux Grandes Cabanes (à gauche) et au Fumemorte (à droite) en fonction du stade de développement

Quand se déroule l'échappement des anguilles ?

Suivi par télémétrie RFID



Figure 15 : Illustration d'un suivi en télémétrie RFID © C. Lefebvre

Le principe de la télémétrie RFID (*Radio-Frequency Identification*) est de détecter et d'enregistrer le passage d'individus marqués grâce à un champ électromagnétique (Figure 15, Annexe 9). Les détections *in situ* d'individus marqués permettent de percevoir leur déplacement. Un total de 6 stations d'écoute RFID fixes ont été positionnées à des points stratégiques afin de caractériser les échanges d'anguilles entre les bassins ciblés (Fumemorte et Grandes Cabanes) et les systèmes adjacents (Figure 16, Annexe 10).

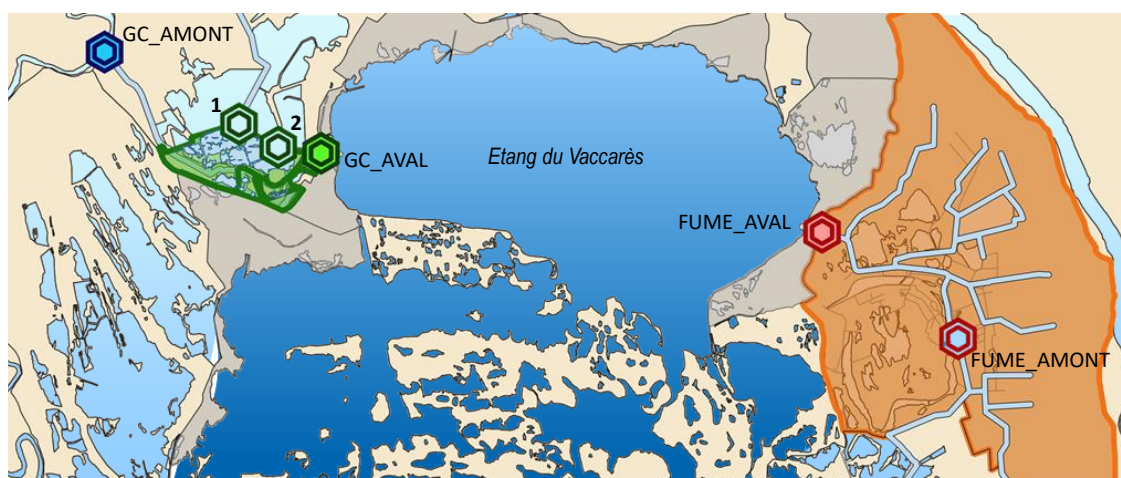


Figure 16 : Localisation des stations d'écoute RFID fixes installées aux Grandes Cabanes et au Fumemorte. La station 1 correspond à l'emplacement de la martelière « Ivrognes » et la station 2 à celle de la « Pompe ».

Le suivi par télémétrie RFID repose, d'une part, sur le bon fonctionnement en continu des stations d'écoute, et d'autre part, sur la capture et le marquage d'un nombre suffisamment important d'individus pour avoir des résultats représentatifs des sous-populations ciblées.

Etat de fonctionnement & efficacité des stations RFID

Afin d'évaluer l'état de fonctionnement des 6 stations d'écoute RFID, plusieurs sources d'information (détections des marker-tags, portée de détection et détections d'individus marqués) ont été combinées (Annexe 11). Dans la suite du rapport, les résultats sont présentés uniquement pour les stations RFID de Fume_Aval, GC-Amont et GC-Aval, à partir de mai 2022, car ce sont les stations qui permettent de caractériser la dynamique d'échappement des anguilles argentées et qui ont eu un fonctionnement satisfaisant (Figure A83).

Ensuite, une probabilité de détection des anguilles marquées a été estimée mensuellement par station RFID (Annexe 12). Le calcul s’est basé sur les détections des antennes amont et aval pour les stations ayant un double rideau d’antennes (GC-Amont et GC-Aval), et à partir des recaptures d’individus marqués par pêche pour la station ayant un seul rideau d’antennes (Fume-Aval, Annexe 12). Les probabilités de détection des anguilles des stations RFID GC-Amont et GC-Aval sont très élevées (en moyenne 0.97 et 0.87, respectivement, Figure A85). A la station Fume-Aval, l’estimation de la probabilité de détection s’est basée sur 27 occasions seulement (lorsque des individus marqués ont été recapturés dans le filet situé juste à l’aval du rideau d’antennes). De mai 2022 à mai 2025, cette probabilité de détection est de 0.44 en moyenne (IC95% : [0.26, 0.64], Figure A86).

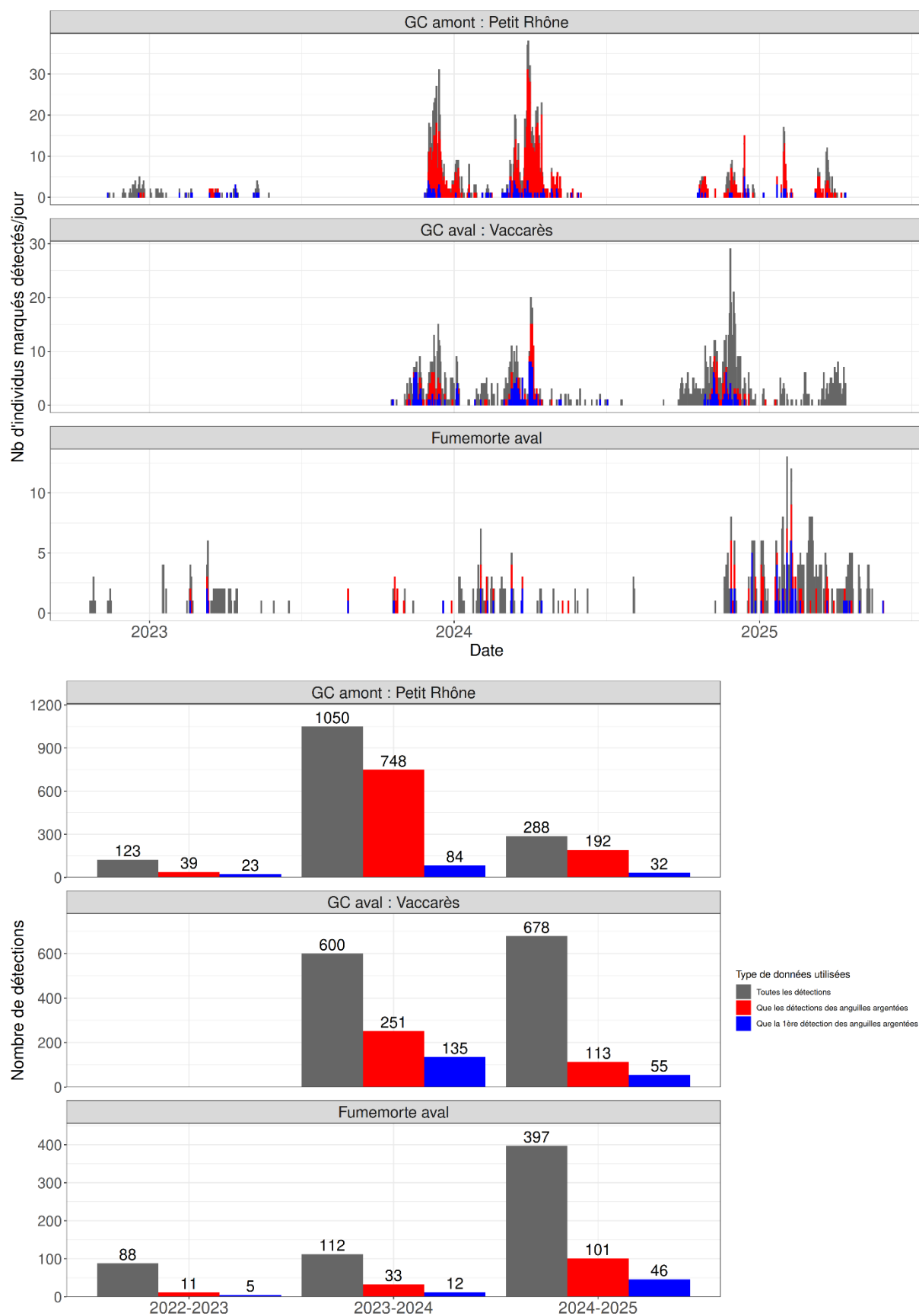
Détections des individus par les stations RFID

Sur les 4557 individus marqués avec une marque RFID, un total de 1575 a été détecté par au moins une des stations RFID, soit 34.6% (Figure A91). Seulement 7.3% des individus marqués avec une puce de 12 mm (n=986) ont été détectés, contre 42% de ceux équipés avec une puce de 23 mm (n=1575, Figure A91).

Afin d’étudier l’échappement des anguilles argentées, l’analyse de données s’est focalisée sur les anguilles marquées et caractérisées lors de leur dernière capture comme argentées, d’après l’indice développé par (Durif et al. 2005, Annexe 8). Aux 3 stations RFID présélectionnées, un total de 392 individus argentés ont été détectés de septembre 2022 à mai 2025 (Tableau 1). Uniquement la date de première détection de ces individus à une de ces 3 stations RFID a été utilisée, afin de considérer le moment initial où les individus cherchent à s’échapper du système (c.-à-d. le moment le plus proche de la phase de déclenchement de l’échappement, Annexe 13). Cela a conduit à sélectionner 25.3% des détections d’individus argentés (Figure 17). En effet, des individus ont pu être détectés à plusieurs reprises au cours du temps et à différentes stations RFID (Figure 17). Globalement, 75% des anguilles argentées ont été détectées à une seule station RFID (Figure A92). Après leur dernière capture au filet, plus de 50% des individus argentés ont été détectés pour la première fois au cours du mois suivant, et plus de 90% dans les 6 mois à une des 3 stations RFID (Figure A93). Les anguilles argentées sont plus mobiles et ont une plus grande probabilité d’être capturés dans les filets que les anguilles jaunes (Hoste et al. 2024). Finalement, l’étude de la dynamique d’échappement se base essentiellement sur des individus argentés qui ont été marqués dans l’année de suivi. Il est à noter que de nombreuses re-détections d’anguilles argentées marquées ont été observées, en particulier, à la station GC-Amont (Figure 17).

Tableau 1 : Nombre d’anguilles argentées détectées par station RFID et en fonction du sexe

SITE	FEMELLE	MALE	TOTAL
GC-Amont	123	16	139
GC-Aval	164	26	329
Fume-Aval	55	8	63



Période d'échappement

Les variations interannuelles et intra-annuelles des échappements d'anguilles ont été caractérisées à l'aide de modèles bayésiens (Annexe 13).

Variation interannuelle de l'effectif des anguilles argentées à l'échappement

Les 3 stations RFID ont été suivies durant 3 années (2022-2023, 2023-2024 et 2024-2025). Aucune détection n'a été observée la première saison à GC-Aval car la reconnexion entre le site des Grandes Cabanes et l'étang du Vaccarès n'était pas encore restaurée. L'absence de détection confirme qu'aucune anguille ne pouvait alors emprunter ce passage. Par contre, dès la reconnexion établie, des détections y ont été enregistrées. Par conséquent, pour cette station, uniquement deux saisons de suivi ont été considérées (2023-2024 et 2024-2025).

Aux stations GC-Amont et GC-Aval, l'année 2023-2024 a été celle où les échappements d'anguilles argentées ont été observés les plus nombreux (pour GC-Amont, en moyenne 1.8 fois plus que la médiane des 3 années de suivi; Intervalle de crédibilité à 95% (IC95%) : [1.0,2.8] ; et pour GC-Aval, en moyenne 2.3 fois plus par rapport à la médiane des 2 années de suivi, IC95% : [1.1,4.1], Figure 18). L'échappement a été le plus faible à la station GC-Amont la première année de suivi 2022-2023 (en moyenne 0.6 fois moins que la médiane des 3 années de suivi; IC95% : [0.4,1.0], Figure 18).

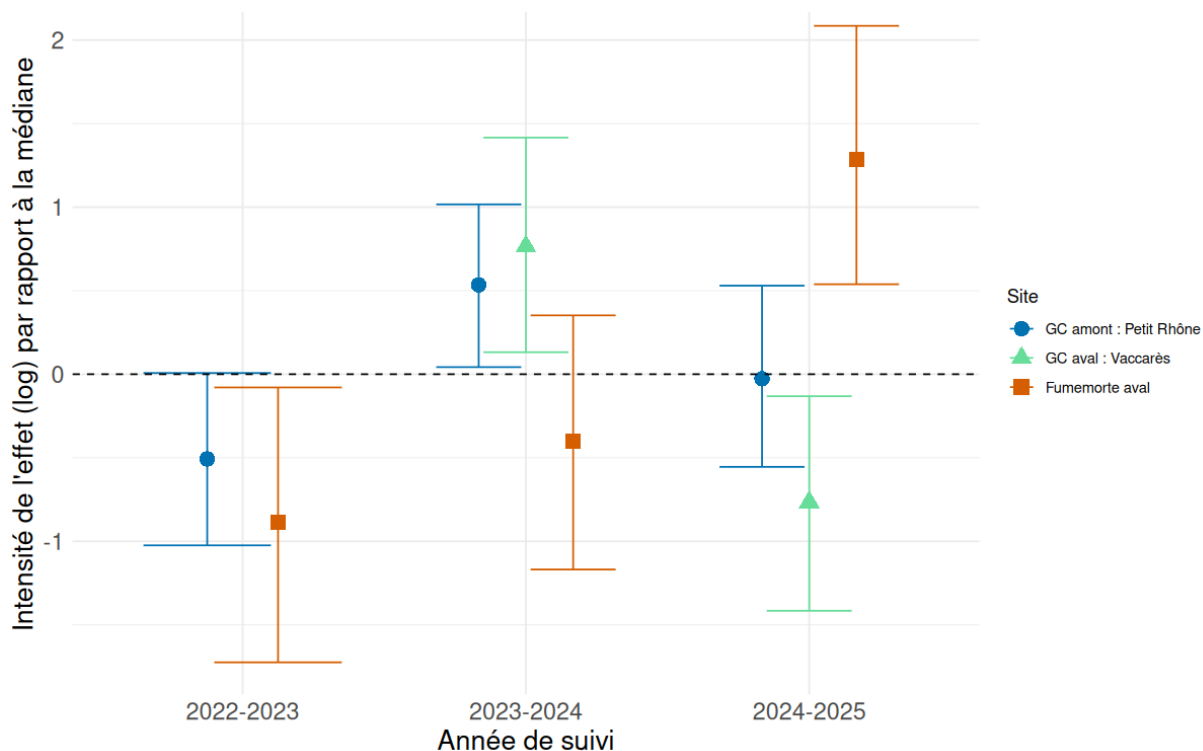


Figure 18 : Effet de l'année de suivi sur l'effectif moyen interannuel des anguilles argentées à l'échappement (c'est-à-dire lors de leur première détection) par station RFID.

Durant les 3 années de suivi, une augmentation de l'effectif des anguilles à l'échappement a été observée à Fume-Aval, avec un maximum durant la dernière année de suivi 2024-2025 (avec 2.2 fois plus, IC95% : [0.8,3.6]) d'échappements qu'en 2022-2023, Figure 18).

Ces variations interannuelles de l'échappement peuvent s'expliquer par différents facteurs, à commencer par l'effort de pêche, l'efficacité des captures et l'effort de marquage. Même si l'effort de pêche a été relativement constant au cours du temps (Annexe 5), l'efficacité des captures peut

grandement varier en fonction des conditions météorologiques et hydrologiques. Poursuivre ce suivi sur davantage d'années permettra de mieux appréhender ces variations.

Sachant que 2023-2024 a été l'année de suivi où l'échappement a été le meilleur pour les deux stations RFID du bassin des Grandes Cabanes, cela pourrait suggérer que les anguilles argentées de ce système ont une dynamique interannuelle similaire quel que soit la voie d'échappement optée. Cependant, uniquement deux années de suivi sont concomitantes pour les deux stations RFID. Davantage d'années suivies permettra de tester cette hypothèse.

Variation intra-annuelle de l'effectif des anguilles argentées à l'échappement

Par année de suivi, globalement, la période d'échappement des anguilles argentées s'est étendue de l'automne au printemps pour les 3 stations RFID (Figure 19). Cependant, des différences notables ont été obtenues en fonction de la station RFID étudiée.

Au niveau des Grandes Cabanes, des différences ont été mises en évidence entre les voies d'échappement amont et aval. A GC-Aval, l'échappement se scinde en deux saisons : novembre et décembre, puis mars et avril (Figure 19). Le pic d'échappement y est le plus important en novembre (25.6 fois plus par rapport à l'effectif médian sur l'année, IC95% : [5.0,84.6]). A GC-Amont, l'échappement semble plus tardif avec des détections plus nombreuses à partir de décembre (6.0 fois plus par rapport à l'effectif médian sur l'année ; IC95% : [2.1,13.9]) et jusqu'en mai. Pour ces deux stations, l'échappement est plus faible aux mois de janvier et février (Figure 19).

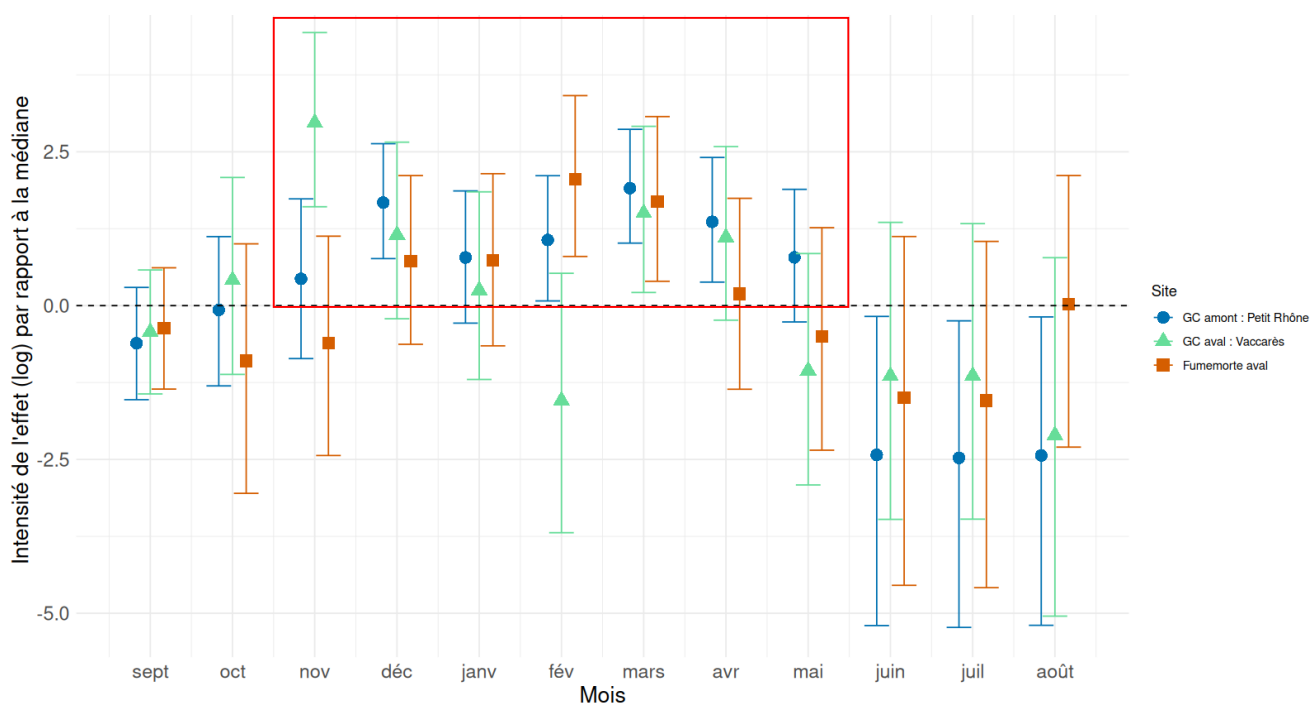


Figure 19 : Effet du mois par rapport à l'effectif moyen annuel des anguilles argentées à l'échappement par station RFID.

A Fume-Aval, l'échappement devient plus important que l'effectif médian annuel à partir de décembre (2.6 fois plus que la médiane annuelle ; IC95% : [0.5,8.3], Figure 19). Et le pic d'échappement est observé en février-mars (respectivement, 9.6 et 6.9 fois plus d'anguilles argentées détectées par rapport à la médiane annuelle ; IC95% : [2.2,30.4] et [1.5,21.6]). Tout comme aux Grandes Cabanes, les mois d'été ont un effet fortement négatif sur l'échappement (en moyenne 0.5 fois moins d'anguilles détectées par rapport à la médiane annuelle ; IC95% : [0.01,3.1]).

Les mois d'été, défavorables à l'échappement, présente de larges intervalles de crédibilité provenant sûrement du manque de données pour ces mois (Figure 19). Cette plus faible quantité de données à implémenter dans le modèle aboutit à une grande variabilité de l'estimation des effets de

ces mois. En revanche, ces résultats confirment que la période estivale n'est pas la période privilégiée pour l'échappement des anguilles argentées.

Sous quelle influence se déroule l'échappement ?

Par station RFID, deux types de modèles ont été réalisés afin de tester l'influence des variables environnementales : en incluant l'année et (i) seulement les données environnementales non limitantes (variables météorologiques, phase lunaire et débit du Rhône), puis (ii) en ajoutant des variables relatives à la qualité de l'eau (conductivité, température de l'eau) et au niveau d'eau mesurées à proximité des stations étudiées (Annexe 13). Seules les variables environnementales non corrélées entre elles et non corrélées à l'année ont été testées (Annexe 13).

Pour chaque station RFID, un fort effet négatif de la température de l'air (ou de l'eau) sur l'échappement a été obtenu (Figure 20 et Figure 21). Cet effet traduit l'importance du patron saisonnier dans la dynamique d'échappement des anguilles argentées : l'échappement est plus important quand les températures sont plus fraîches (de l'automne au printemps) que lorsqu'elles sont plus élevées (mois d'été). Avant tout, c'est donc la saison qui a été obtenue déterminante pour expliquer l'échappement des anguilles argentées. En supplément, dans une moindre mesure, d'autres variables environnementales ont une influence sur l'échappement.

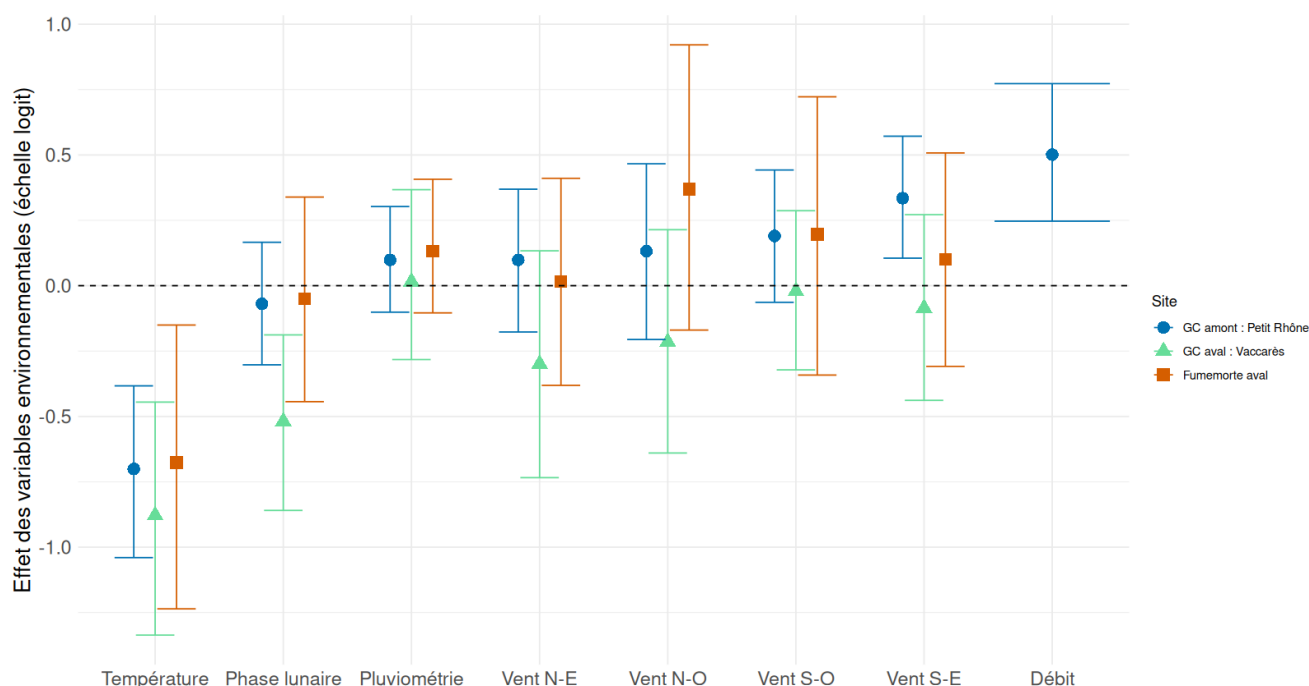


Figure 20 : Effet des variables environnementales météorologiques, la phase lunaire et du débit du Rhône (médiane et IC95%) sur l'échappement des anguilles argentées par station RFID.

GC-Amont

Le second paramètre environnemental influençant l'échappement à la station GC-Amont est le débit du Rhône (Figure 20), avec un effet multiplicateur de 1.6 par rapport à la valeur médiane annuelle (IC95% : [1.3,2.2]). Viennent ensuite les effets positifs du vent sur l'échappement des anguilles, quel que soit le secteur. Les vents de secteur S-E et S-O ont des effets plus prononcés que ceux de secteur N-E et N-O (moins de 80% des données sont positives). La pluviométrie a également

une petite influence positive sur l'échappement, tandis que l'effet de la phase lunaire ne semble pas impacter l'échappement (Figure 20).

Le deuxième modèle, réalisé en conservant uniquement les variables ayant un effet non nul (c.-à-d., plus de 80% des estimations du paramètre sont différentes de 0) du premier modèle, montre des résultats similaires (Figure 21). Après la température (ici de l'eau), le débit du Rhône est toujours la seconde variable influençant le plus l'échappement des anguilles (effet médian multiplicateur de 1.5 avec IC95% : [1.2,2.0]). En plus de la pluviométrie, seul le vent de secteur S-E semble exercer une influence positive non négligeable sur l'échappement. L'effet du niveau d'eau est bien estimé par le modèle (IC95% : [0.7,1.1]) mais il est obtenu faible et négatif (effet médian multiplicateur de 0.9). A ce site, un faible niveau d'eau du canal a été obtenu lorsque l'ouvrage de connexion avec le Petit Rhône était fermé. Ces conditions ne favoriseraient donc pas l'échappement. Lorsque l'ouvrage est ouvert, l'augmentation du niveau d'eau et le courant engendré pourrait représenter un signal d'appel pour les anguilles argentées, et dans ce cas, un effet positif du niveau d'eau sur l'échappement était attendu. Toutefois, cet effet n'a pas été mis ici en évidence, alors qu'un effet positif du débit du Rhône a été obtenu, suggérant que les anguilles parviendraient à détecter ce signal environnemental. Davantage d'années de suivis permettra de mieux appréhender ces facteurs déclencheurs.

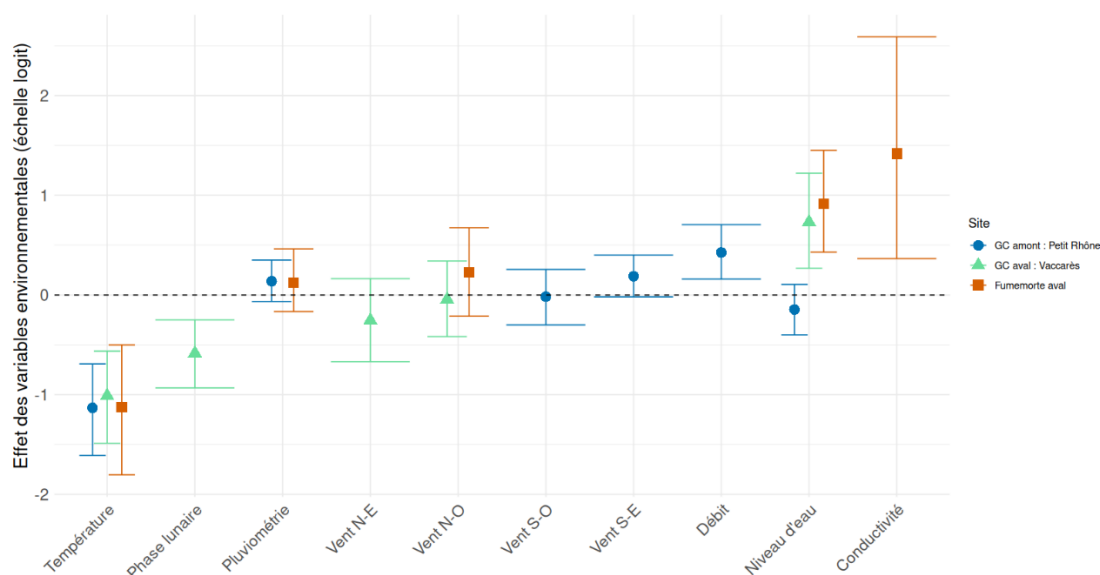


Figure 21 : Effet des variables environnementales (médiane et CI 95%) sur l'échappement des anguilles argentées en fonction du site d'étude (sélection des données comparé à la figure 20 par rapport aux données disponibles au niveau local).

GC-Aval

Pour cette station, le fait d'avoir seulement deux années de suivis limite la portée des résultats. Après la température de l'air dans le premier modèle, la phase lunaire et les vents de secteur N-O et N-E ont été mis en évidence comme variables influençant de manière négative et non négligeable l'échappement (Figure 20). L'échappement semble ainsi être favorisé en dehors des périodes de pleine lune, ce qui a déjà été observé par ailleurs (Trancart et al. 2017, Teichert et al. 2020). Un effet négatif des vents du N-O et N-E a été mis en évidence, alors que les vents du Sud n'ont pas eu d'influence sur l'échappement. Par ailleurs, le modèle réalisé avec les données environnementales à plus fine échelle ne fait plus ressortir qu'un faible effet négatif du vent de secteur N-E seulement (Figure 21). Une mise en mouvement des eaux du Vaccarès par du vent N-E en direction du canal de reconnexion freinerait-elle l'échappement des anguilles ? Ce résultat nécessite d'être approfondi et d'acquérir davantage de données pour conclure sur cet effet.

De plus, le deuxième modèle a mis en évidence un effet fort et positif du niveau d'eau (effet médian multiplicateur de 2.1 ; IC95% : [1.3,3.4]) sur l'échappement des anguilles (Figure 21). Une hausse de niveau d'eau y semble ainsi plus favorable à l'échappement.

Fume-Aval

Dans le canal du Fumemorte, la température de l'air, la pluviométrie et les vents du N-O ont une influence non négligeable sur l'échappement (Figure 20). Après la température, l'effet du vent de secteur N-O (mistral) est le plus fort (avec un effet médian multiplicateur de 1.4) mais avec un écart de crédibilité très large (IC95% : [0.8,2.5]), donc une estimation incertaine. De même, du fait d'une forte incertitude, l'effet positif du vent du S-O est considéré comme non significatif (80% des estimations ne sont pas positives). L'effet de la pluviométrie est mieux estimé mais avec un faible effet positif (effet médian multiplicateur de 1.1 ; IC95% : [0.9,1.5]) sur l'échappement. Cette variable ne ressort plus comme ayant un effet significatif dans le deuxième modèle (Figure 21), confirmant sa faible influence sur l'échappement.

En revanche, dans le deuxième modèle, la conductivité et le niveau d'eau ont des effets positifs forts sur l'échappement, et le vent du N-O conserve un effet positif faible. L'augmentation de la conductivité et du niveau d'eau pourraient refléter des mouvements d'eau provenant de l'étang du Vaccarès et remontant dans le canal du Fumemorte, notamment lors des coups de mistral. Cette mise en mouvement de l'eau pourrait constituer un signal de départ pour les anguilles argentées du canal.

Par où s'échappent les anguilles ?

Dans un premier temps, les détections RFID sur le site des Grandes Cabanes ont été analysées, en regard des deux voies d'échappement possibles, c.-à-d. vers l'aval ou vers l'amont. Puis, à partir d'un suivi en télémétrie acoustique, les voies d'échappement des anguilles femelles argentées du bassin des Grandes Cabanes et du canal du Fumemorte ont été étudiées jusqu'aux portes de la mer.

Éléments de réponses obtenus à partir des détections RFID

Tandis que les anguilles argentées du canal du Fumemorte ont une seule issue pour rejoindre la mer : l'embouchure du canal dans l'étang du Vaccarès (station RFID Fume-Aval), deux voies potentielles s'offrent aux anguilles du bassin des Grandes Cabanes. Celles-ci peuvent soit s'échapper en direction de l'étang du Vaccarès, vers l'aval (GC-Aval), ou en rejoignant le Petit Rhône, à l'amont (GC-Amont, Figure 22).

Sur les 3 années de suivi, plus de 60% des anguilles argentées marquées ont été détectées à l'aval des Grandes Cabanes, que ce soit en première ou en dernière détection (Figure 22). L'échappement en direction de l'étang du Vaccarès semble ainsi être, chaque année, la voie majoritairement utilisée par les anguilles argentées des Grandes Cabanes. Toutefois, il est noté que chaque année du suivi, entre 21 et 39% des individus argentés cherchent en première instance à s'échapper par le Petit Rhône en remontant le canal d'alimentation (Figure 22). Et ces proportions restent similaires en considérant uniquement les dernières détections des individus (Figure 22). Bien que quelques individus aient testé les différentes voies de sortie, la plupart ont été détectés à une seule station RFID (Figure A92). Ces résultats semblent donc indiqués qu'une proportion non négligeable d'individus cherchent chaque année à s'échapper par le Petit Rhône. Néanmoins, la station GC-Amont étant localisée à l'amont de la connexion avec le Petit Rhône, il n'est pas possible de vérifier si les individus sont parvenus à rejoindre le Petit Rhône. En effet, les détections RFID ont montré que les individus pouvaient être détectées de nombreuses fois à la même station, en particulier à la station GC-Amont (Figure 17). Les anguilles arrivent-elles à passer à travers la station de pompage (qui n'a jamais été mise en fonctionnement pendant la durée du projet) et l'ouvrage de connexion ? Font-elles demi-tour devant l'ouvrage ? Leur passage est-il empêché par la présence d'une grille ou d'embâcles ?

Pour mieux appréhender les voies empruntées par les anguilles argentées jusqu'aux portes de la mer, un suivi en télémétrie acoustique a été mis en place. Ce suivi a également permis d'en savoir plus sur la voie dite « Petit Rhône ».

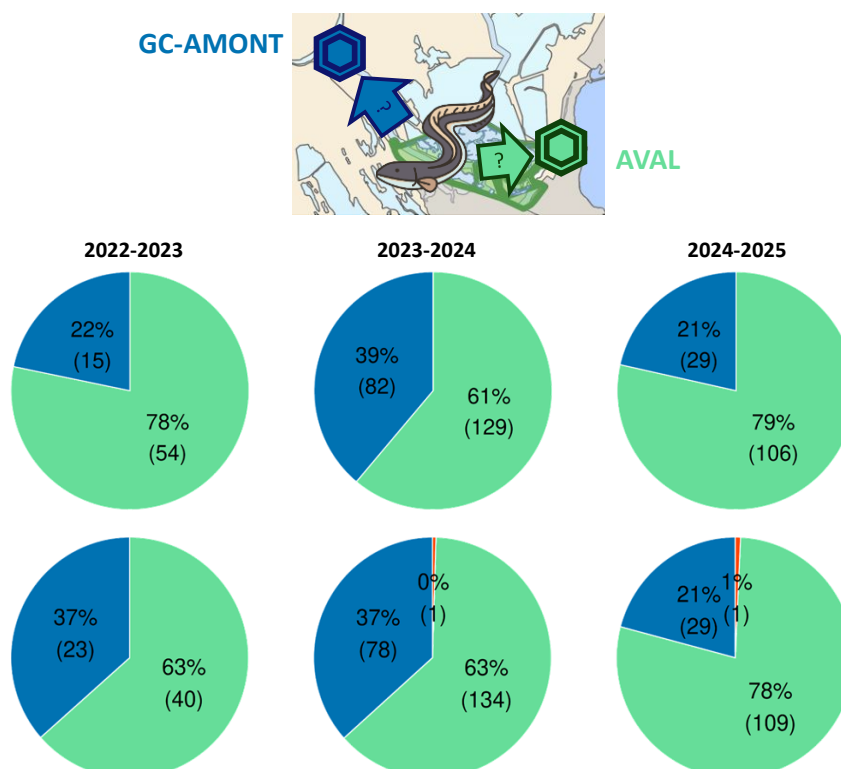


Figure 22 : Proportions (et nombre) d'individus marqués argentés et détectés en fonction des sites de détection RFID amont ou aval aux Grandes Cabanes par année de suivi, (en haut) en première détection et (en bas) en dernière détection. En 2022-2023, les stations RFID Aval sont uniquement Ivrognes et Pompe. Aux deux années de suivi suivantes, s'ajoute la station GC-Aval. En rouge sont indiqués les individus qui ont été détectés pour la dernière fois à la station Fume-Aval.

Etude des voies d'échappement par télémétrie acoustique

Pour les saisons 2023-2024 et 2024-2025, un suivi en télémétrie acoustique (Figure 23) a été mis en place dans le but de suivre le retour d'anguilles femelles argentées des deux bassins étudiés (Grandes Cabanes et Fumemorte) jusqu'aux portes de la mer (Figure 24). Cette technologie est complémentaire par rapport à la télémétrie RFID (Annexe 15). Ce suivi avait pour objectif d'étudier les voies d'échappement par les anguilles argentées (*via* le pertuis de la Fourcade, *via* le pertuis de Comtesse et les étangs et marais des Salins de Camargue ou *via* le Petit Rhône), si l'une était privilégiée et de caractériser les durées d'échappement.



Figure 23 : Illustration du principe de la télémétrie acoustique. © C. Lefebvre

Mise en place du réseau des hydrophones

Un réseau de 16 hydrophones, la première année, et de 24 hydrophones, la deuxième année a été déployé (Figure 24, Annexe 16). Ce déploiement a nécessité la réalisation de campagnes de terrain pour tester les portées de détection, choisir le nombre d'hydrophones et les sites d'installation, ainsi que la confection de structures de fixation adaptées pour sécuriser les hydrophones (Annexe 16). Ce réseau est compatible avec le réseau CONNECT-MED qui est déployé tout autour du littoral méditerranéen français (Projet de l'UMR-MARBEC / CNRS, Figure 24).

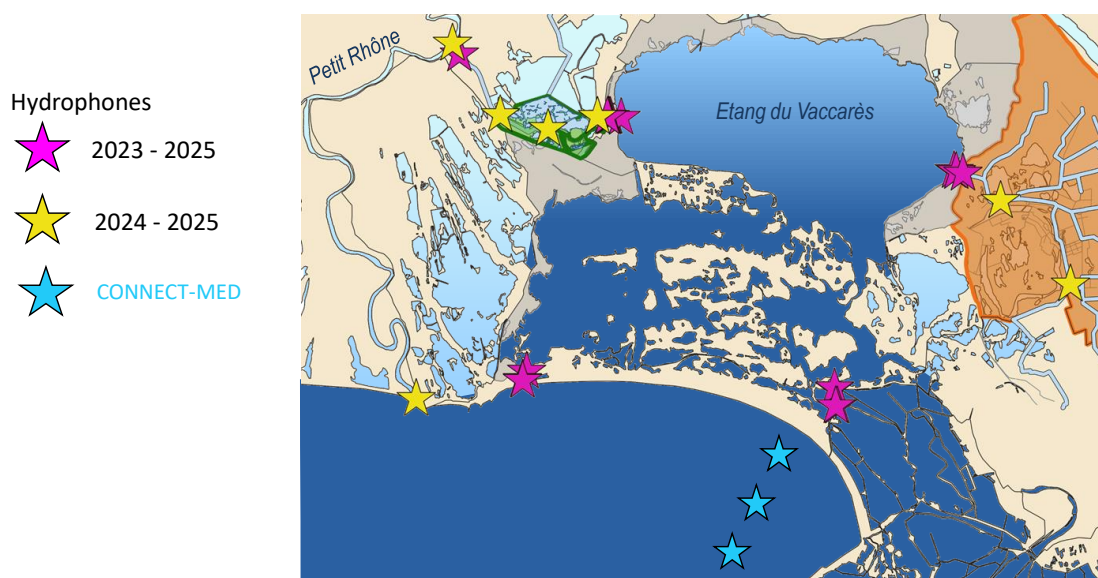


Figure 24 : Localisation des stations d'hydrophones pour les deux années de suivi acoustique de la dévalaison des anguilles dans le delta de Camargue. Les hydrophones du projet Connect-med (hors COLAGANG) sont également indiqués.

Marquage acoustique

Afin d'acquérir des résultats suffisamment robustes, il était initialement prévu de marquer 40 individus par bassin et par an, soit un total de 160 individus. L'autorisation ministérielle pour le triple marquage (acoustique, RFID et peinture acrylique, Annexe 17) de ce total de 160 individus sur les deux années (2023-2025) a été obtenue en juillet 2023 (procédure #43678). Finalement, un total de 121 anguilles argentées femelles, supérieures à 60 cm, ont été marquées en acoustique (Tableau 2 et Annexe 17). La première année, seulement 41 émetteurs acoustiques ont été posés (dont 35 aux Grandes Cabanes et 6 au Fumemorte). La deuxième année, un total de 80 émetteurs a été posé, dont les 39 émetteurs non utilisés la première année, et 41 nouveaux émetteurs acquis en fin d'été 2024, dont 40 étaient équipés d'un capteur de prédation.

L'utilisation d'émetteur intégrant un capteur de prédation permet d'enregistrer le moment où l'individu marqué passe dans l'estomac acide d'un prédateur. Le moment de l'acte de prédation peut être renseigné si l'émetteur passe à proximité d'un hydrophone, c.-à-d. si le prédateur passe près d'un hydrophone avant que l'émetteur soit rejeté. C'est notamment pour cette raison que trois hydrophones supplémentaires ont été placés la deuxième année à l'intérieur du bassin des Grandes Cabanes, ainsi que 2 autres dans le canal du Fumemorte. L'objectif était notamment d'obtenir des indices sur la prédation du silure glane sur les anguilles argentées.

Détections acoustiques

Pour simplifier l'analyse des détections acoustiques un regroupement des hydrophones par secteur a été réalisé (Figure 25).

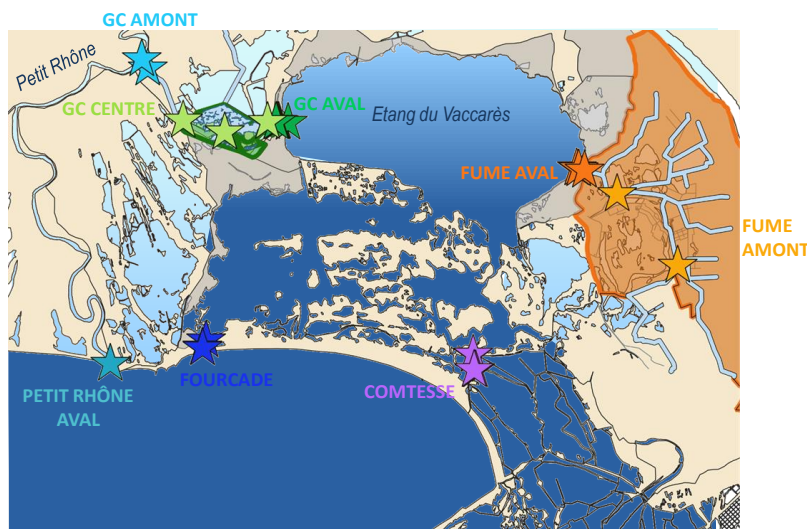


Figure 25 : Regroupement des hydrophones par secteur pour l'analyse des détections acoustiques.

Sur les deux années de suivi, parmi le total des 121 individus marqués, 115 ont été détectés au moins une fois par un des hydrophones (Tableau 2), et 98 au moins une fois par un des hydrophones localisés à l'une des sorties de nos sites étudiés (c.-à-d. aux sorties amont et aval des Grandes Cabanes et à la sortie aval du Fumemorte, Tableau 2).

En 2023-2024, l'ensemble des 35 anguilles marquées dans le bassin des Grandes Cabanes a été détecté au moins par un hydrophone, contre un seul sur les 6 marquées dans le canal du Fumemorte. En 2024-2025, 59 individus sur les 61 marqués aux Grandes Cabanes (soit 96%) et les 19 individus marqués au Fumemorte (100%) ont été détectés au moins par un hydrophone. Durant cette deuxième année de suivi, la plus grande proportion d'individus détectés dans le canal du Fumemorte peut s'expliquer par le fait que le réseau d'hydrophones ait été densifié (Figure 24). Toutefois, un plus grand nombre d'individus a été détecté à l'aval du canal du Fumemorte en 2024-2025 par rapport à 2023-2024 (94 % des individus marqués et 16%, respectivement, Tableau 2).

Tableau 2 : Récapitulatif du nombre d'anguilles argentées femelles marquées par bassin et par année de suivi, du nombre d'individus marqués détectés au moins une fois par un des hydrophones, globalement et par secteur (Figure 25), ainsi que du nombre d'individus recapturés par la pêche professionnelle.

ANNEE DE SUIVI	2023 - 2024		2024 - 2025	
BASSIN D'ORIGINE	FUME	GC	FUME	GC
Nb d'individus marqués en acoustique	6	35	19	61
Nb d'individus recapturés par pêche pro	2	7	1	1
Nb d'individus détectés au moins par 1 hydrophone	1	35	20	59
Nb d'individus détectés au moins une fois à GC AMONT	0	12	0	25

Nb d'individus détectés au moins une fois à GC AVAL	1	27	3	32
Nb d'individus détectés au moins une fois à FUME AMONT	-	-	18	0
Nb d'individus détectés au moins une fois à FUME AVAL	1	3	11	4
Nb d'individus détectés au moins une fois à COMTESSE	0	1	1	0
Nb d'individus détectés au moins une fois à FOURCADE	1	0	0	0
Nb d'individus détectés au moins une fois PETIT RHONE AVAL	-	-	0	15
Nb d'individus équipés d'un capteur prédation	-	-	14	26
Nb d'ind. équipés d'un capteur prédation détectés au moins une fois	-	-	14	25
Nb d'individus détectés prédatés	-	-	0	1

L'échappement *via* l'étang du Vaccarès

La première année de suivi (2023-2024), 74% (26/35) des individus marqués en télémétrie acoustique dans le bassin des Grandes Cabanes ont été détectés en premier lieu à l'aval du système (GC AVAL, Figure 25), et 48% (29/61) la deuxième année (2024-2025, Figure 26). Comme nous l'avons vu précédemment avec les détections RFID, les anguilles argentées des Grandes Cabanes semblent donc en majorité privilégier un échappement en passant par l'étang du Vaccarès. Néanmoins, cette voie n'apparaît pas fonctionnelle, puisqu'aucun de ces individus détectés à l'aval des Grandes Cabanes n'a été ensuite détecté à l'aval des deux passages clés pour rejoindre la mer (c.-à-d. les pertuis de la Fourcade et de la Comtesse, Figure 32).

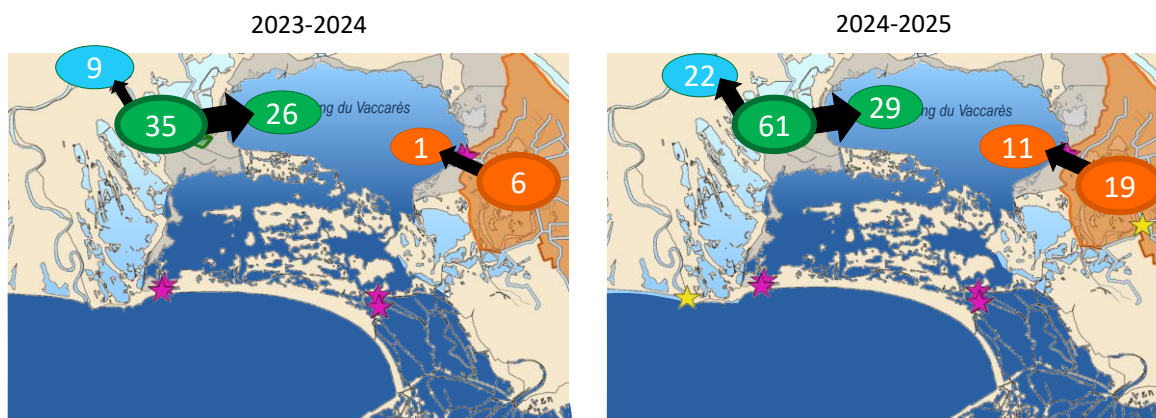


Figure 26 : Résumé graphique du nombre d'individus marqués en acoustique (ovales aux traits épais), détectés en premier lieu par une sortie, par bassin étudié (en vert, Grandes Cabanes ; en orange, Fumemorte ; en bleu la connexion des Grandes Cabanes au Petit Rhône), et par année de suivi.

Lors de l'année de suivi 2023-2024, un individu des Grandes Cabanes a été détecté en amont du pertuis de la Comtesse une première fois le 16 décembre 2023, puis une seconde fois le 3 mars 2024 (Figure 27). Mais ensuite, il a été redétecté à l'aval des Grandes Cabanes, et son dernier signalement fut sa recapture par un pêcheur professionnel (Figure 27). Lors de sa détection à l'amont du pertuis de la Comtesse le 16 décembre 2023, les vannes du pertuis étaient fermées depuis le 4 décembre 2023 afin de limiter la salinisation de la RNNC (SNPN, pers. com.). Les vannes de la Comtesse ont été réouvertes le 18 décembre 2023, et le sont restées en continu jusqu'au 3 mars 2024 inclus, sauf du 5 au 8 janvier 2024 et du 20 au 25 janvier 2024. Le 3 mars 2024, lors de la détection de l'individu, le pertuis de la Comtesse était donc ouvert, en revanche l'ouvrage suivant à l'aval, celui qui sépare l'étang du Tampan et l'étang du Galabert (Figure A109) était fermé. Par conséquent, l'individu en question ne pouvait pas rejoindre la mer par cette voie à ce moment-là.

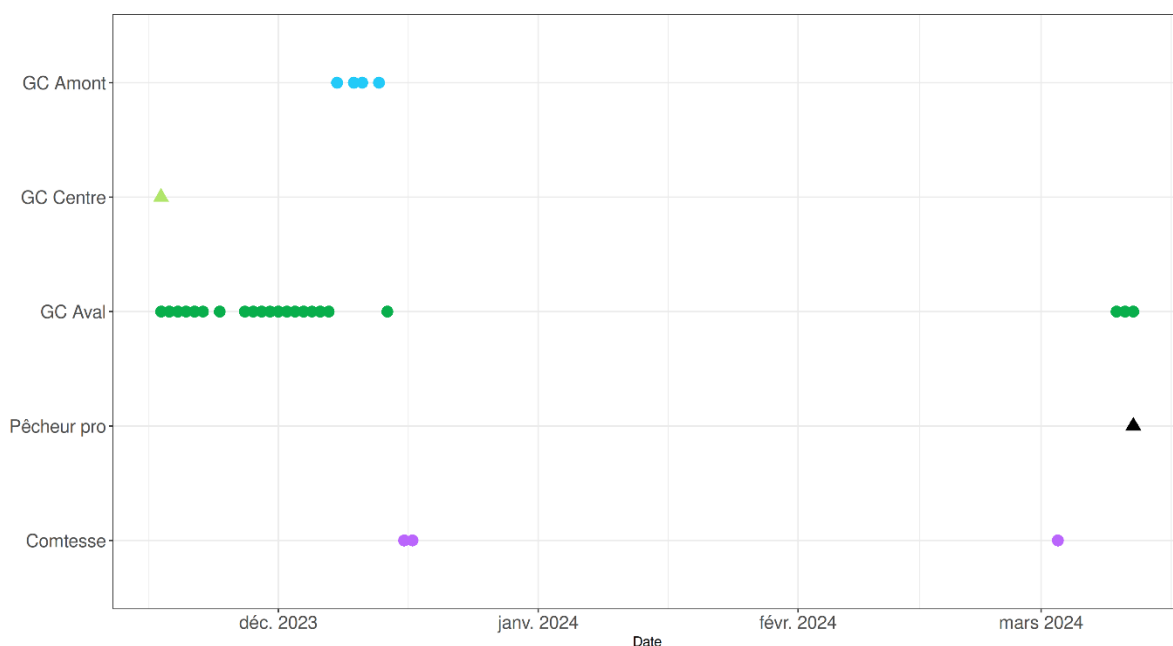


Figure 27 : Détections par les hydrophones (rond) et recapture au filet (triangle) de l'anguille argentée équipée de l'émetteur 15603532611 au cours du temps.

Parmi les 26 et 29 individus des Grandes Cabanes détectés en premier lieu à l'aval de ce système, en 2023-2024 et 2024-2025 respectivement, la majorité d'entre eux a été détecté en dernier lieu du côté de l'étang du Vaccarès (81% en 2023-2024 et 72% en 2024-2025, Figure 28). Ces individus ont donc soit été détectés dans le même secteur (à l'aval des Grandes Cabanes, 21 et 21 respectivement par année de suivi), soit à l'aval du canal du Fumemorte (2 et 4), ou soit chez un pêcheur professionnel (2 et 1). Ce résultat a mis en évidence qu'une grande majorité des individus n'est pas parvenue à trouver une issue en direction de la mer.

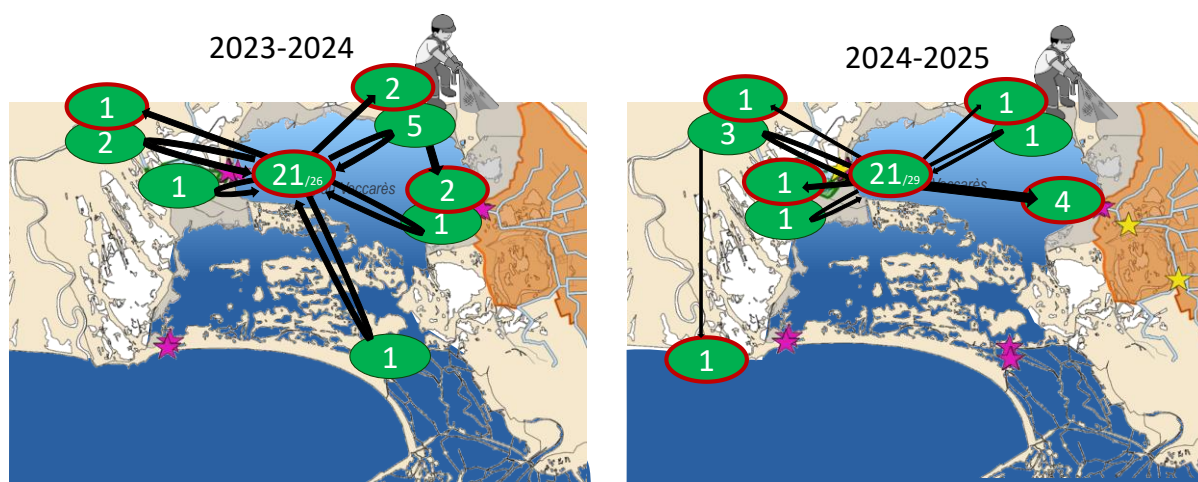


Figure 28 : Résumé graphique des déplacements des anguilles argentées des Grandes Cabanes marquées en acoustique après leur première détection à l'aval des Grandes Cabanes, par année de suivi, par rapport aux 26 initialement détectées en 2023-2024 et aux 29 en 2024-2025. Les cercles rouges indiquent le nombre d'individus détectés en dernier, les autres cercles indiquent le nombre d'individus ayant transité par les secteurs où ils sont localisés. La figurine du pêcheur indique une recapture-relâche par un pêcheur professionnel.

Pour les individus marqués en acoustique dans le canal du Fumemorte, 1 sur 6 en 2023-2024 et 11 sur 19 individus en 2024-2025 ont été détectés à l'embouchure du canal dans l'étang du Vaccarès (Figure 29). Ce seul individu la première année et un seul parmi les 11 individus la deuxième année ont vraisemblablement réussi à passer un des deux pertuis étudiés (soit moins de 2% des 121 individus marqués en acoustique au total).

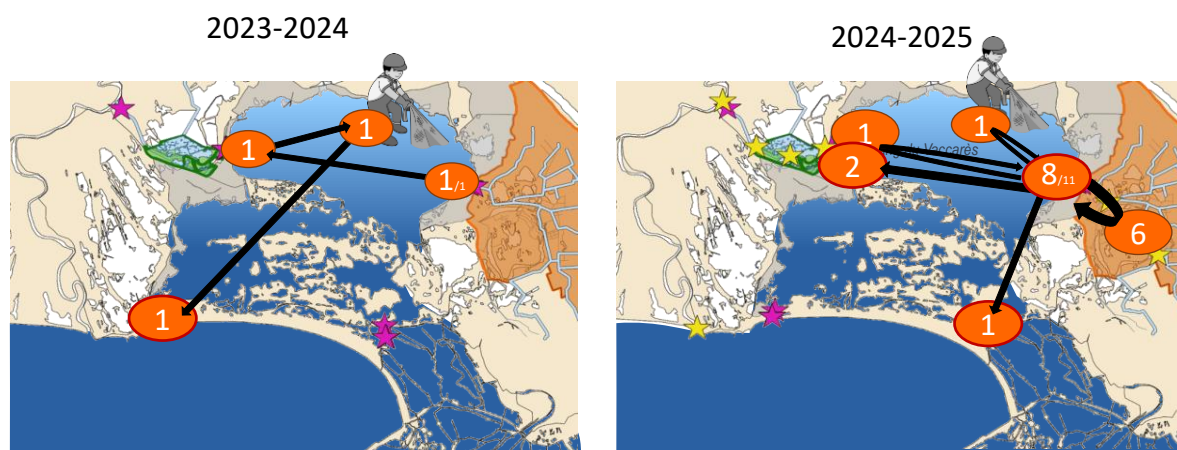


Figure 29 : Résumé graphique des déplacements des anguilles argentées après leur première détection à l'embouchure du canal du Fumemorte par année de suivi, par rapport à la seule initialement détectée en 2023-2024 et aux 11 détectés en 2024-2025. Les cercles rouges indiquent le nombre d'individus détectés en dernier, les autres cercles indiquent le nombre d'individus ayant transité par les secteurs où ils sont localisés. La figurine du pêcheur indique une recapture-relâche par un pêcheur professionnel.

En 2023-2024, la seule anguille détectée à l'embouchure du canal du Fumemorte est parvenue jusqu'au pertuis de la Fourcade, après avoir été détecté à l'embouchure du bassin des Grandes Cabanes dans l'étang du Vaccarès et avoir été recapturée et relâchée par un pêcheur professionnel de l'étang du Vaccarès (Figure 30). Cet individu a été détecté pour la première fois au pertuis de la Fourcade le 12 mars 2024 (à 19h50) et la dernière fois le 10 avril 2024 (à 19h37). A son arrivée, les 7 vannes du pertuis de la Fourcade étaient fermées et le sont restées jusqu'au 10 avril. Le 10 avril, 4 vannes du pertuis ont été entièrement ouvertes, puis refermées le 12 avril. L'individu a donc vraisemblablement profité de cette ouverture pour s'échapper en mer.

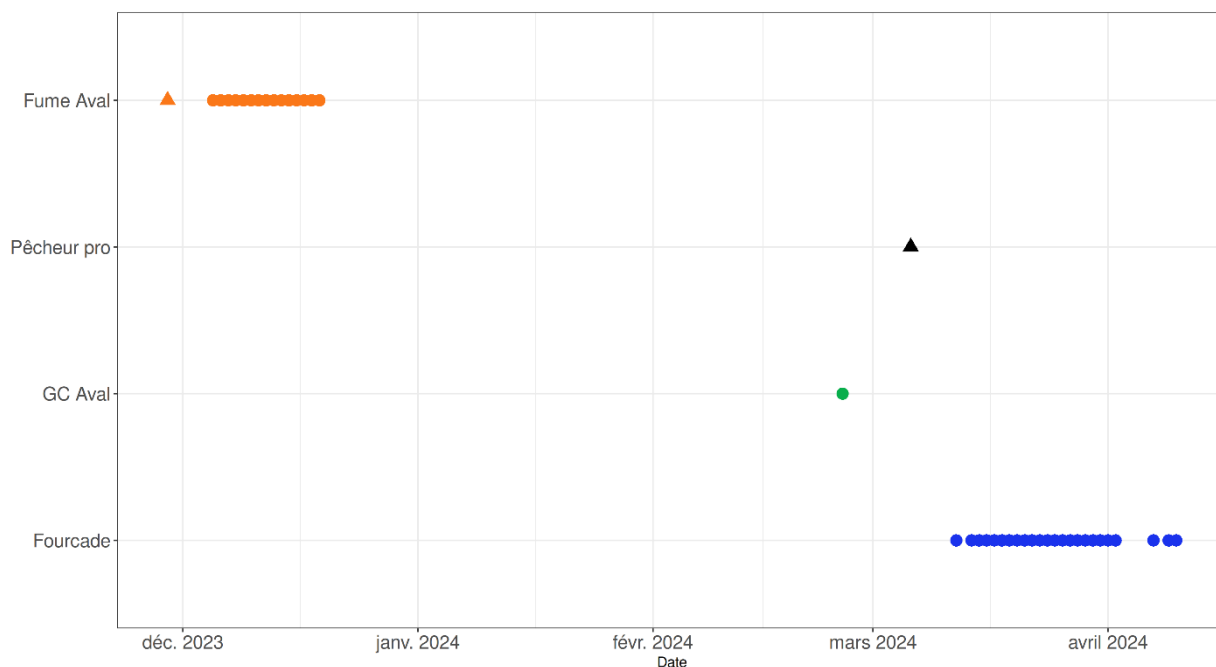


Figure 30 : Détectations par les hydrophones (rond) et recapture au filet (triangle) de l'anguille argentée équipée de l'émetteur 15603530359 au cours du temps.

En 2024-2025, un seul individu a atteint et franchi le pertuis de la Comtesse (Figure 31). Relâché le 10 décembre 2024 dans la zone amont du canal du Fumemorte, il s'est présenté à l'embouchure de ce canal le 24 mars 2025, puis, deux jours plus tard, le 26 mars 2025 (23h30), il est détecté au niveau du pertuis de la Comtesse. Mais ce même jour, les vannes du pertuis avaient été

fermées (SNPN, pers. com.), empêchant cette anguille de passer. L'ouvrage a été de nouveau ouvert le 28 mars, et ce n'est que le lendemain, le 29 mars, que l'individu traverse le pertuis de la Comtesse et est également détecté par l'hydrophone à l'entrée de l'étang du Galabert (à l'aval du pertuis de la Comtesse, Figure A109). Durant cette même journée, l'anguille est revenue une dernière fois au pertuis de la Comtesse, puis a été détecté à nouveau à l'hydrophone du Galabert, suggérant qu'elle s'est bien engagée sur la voie des EMSC pour éventuellement rejoindre la mer.

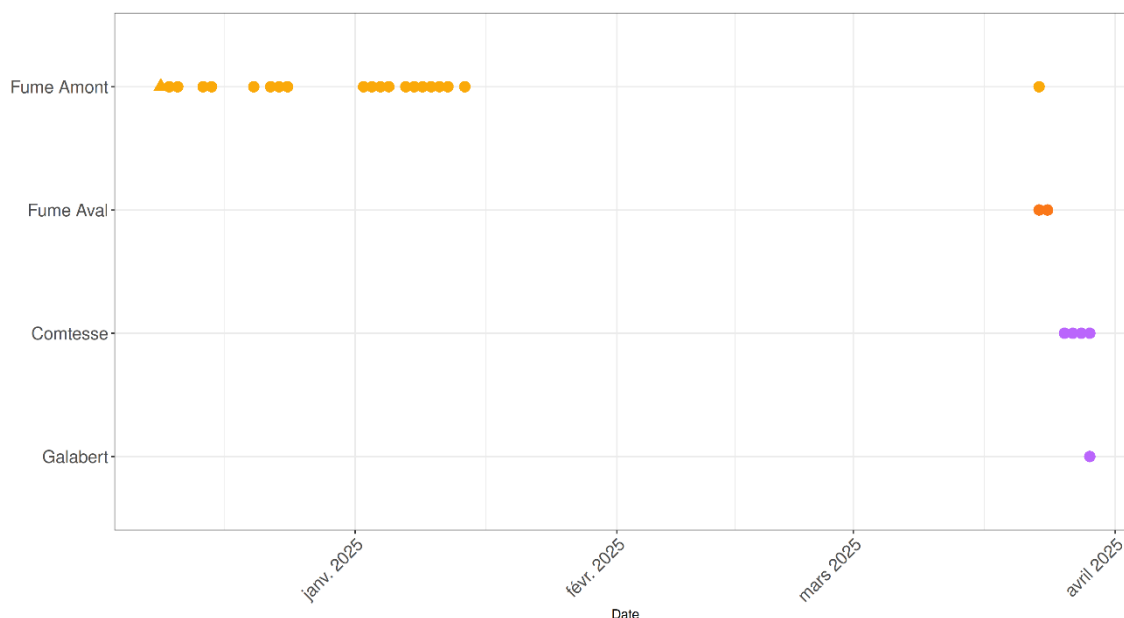


Figure 31 : Détections par les hydrophones (rond) et recapture au filet (triangle) de l'anguille argentée équipée de l'émetteur 15603550429 au cours du temps.

Au total sur les 121 individus marqués aux Grandes Cabanes et dans le canal du Fumemorte, 65 ont donc été détectés pour la dernière fois dans l'étang du Vaccarès suggérant qu'elles ne sont pas parvenues à s'échapper de l'hydrosystème du Vaccarès (Figure 32).

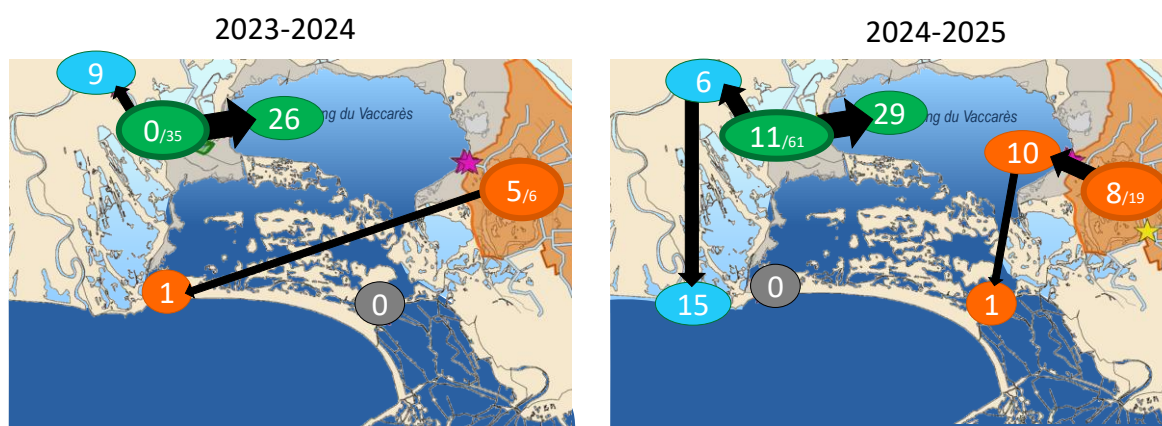


Figure 32 : Résumé graphique du nombre d'individus marqués en télémétrie acoustique (ovales aux traits épais) détectés en dernier lieu par secteur et par bassin étudié (en vert, Grandes Cabanes ; en orange, Fumemorte ; en bleu la connexion des Grandes Cabanes au Petit Rhône), et par année de suivi.

L'échappement *via* le Petit Rhône

Comme vu précédemment, environ un tiers des individus marqués en RFID ont été détectés à la station GC-Amont, à proximité immédiate de la connexion avec le Petit Rhône (Figure 22). Avec le suivi en télémétrie acoustique, 26% (9/35) et 36% (22/61) des individus marqués ont été détectés par le ou les hydrophone(s) placés au niveau de cette connexion avec le Petit Rhône, la première et la deuxième année, respectivement. En 2023-2024, parmi les 9 individus qui y sont détectés, 8 ont leur

dernière détection à ce même secteur (GC-Amont). Le Petit Rhône n'ayant pas encore été équipé avec des hydrophones, il n'a pas été possible de vérifier si ces individus ont pu franchir l'ouvrage de connexion entre la prise gravitaire et le Petit Rhône. Cet ouvrage ayant été majoritairement ouvert durant l'année 2023-2024 (Figure A48), le passage devait être possible pour les anguilles. Mais le fait d'avoir observé de nombreuses re-détectations d'anguilles argentées en RFID, ainsi qu'un individu marqué en acoustique faire demi-tour et être détecté pour la dernière fois au niveau de GC aval, questionnait sur la franchissabilité de cette connexion.

Pour la deuxième année de suivi (2024-2025), deux hydrophones ont été ajoutés dans le Petit Rhône, l'un à proximité immédiate de la prise gravitaire des Grandes Cabanes, et l'autre, à environ 23 km à l'aval, à proximité de l'embouchure du Petit Rhône dans la mer (Figure 24 et Figure 25). Cette année-là, sur les 22 anguilles qui ont été détectées en premier lieu à la sortie amont des Grandes Cabanes (au niveau de la prise d'eau au Petit Rhône), 8 sont revenues au cœur du bassin des Grandes Cabanes (Figure 33). Tandis que 3 d'entre elles sont allées jusqu'à l'étang du Vaccarès, 5 sont ensuite retournées à la connexion avec le Petit Rhône (Figure 33). Au total, ce sont 15 individus d'abord détectés à l'amont du petit Rhône qui ont ensuite été détectés à l'aval du Petit Rhône (Figure 32). L'hydrophone à l'aval du Petit Rhône ayant été placé près de la surface et sur une berge, il est possible que certains individus parmi les 6 individus détectés en dernier à l'amont aient été manqués (Figure 32).

Cette étude a permis de montrer qu'au moins 15 individus sur les 25 ayant été détectés sur le secteur du Petit Rhône (soit 60%), l'ouvrage de la prise d'eau a été franchissable (Tableau 2). Ces résultats inédits ont, de plus, mis en évidence une nouvelle voie d'échappement pour les anguilles argentées des Grandes Cabanes *via* le Petit Rhône. Bien que cette voie n'ait pas été privilégiée par la majorité des individus marqués, elle apparaît comme la voie la plus fonctionnelle pour rejoindre la mer.

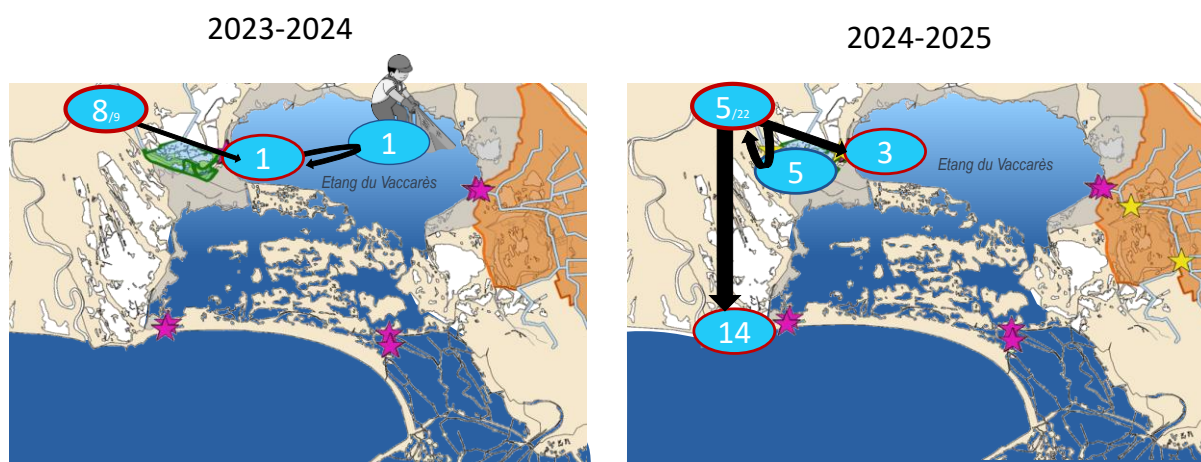


Figure 33 : Résumé graphique des déplacements des anguilles argentées des Grandes Cabanes marquées en télémétrie acoustique après leur première détection à l'amont des Grandes Cabanes, au niveau de la prise d'eau au petit Rhône, par année de suivi, par rapport aux 9 initialement détectées en 2023-2024 et aux 22 en 2024-2025. Les cercles rouges indiquent le nombre d'individus détectés en dernier, les autres cercles indiquent le nombre d'individus ayant transité par les secteurs où ils sont localisés. La figurine du pêcheur indique une recapture-relâche par un pêcheur professionnel.

Une grande variabilité du comportement migratoire

Le suivi des déplacements par télémétrie acoustique a permis de mettre en évidence une grande variabilité du comportement migratoire des anguilles argentées dans le temps et l'espace. Tandis que certains individus ont l'air d'avoir choisi une voie d'échappement et de s'y tenir (par exemple le Petit Rhône pour l'individu #15603550185, Figure A117), d'autres ont eu un comportement beaucoup plus exploratoire (par exemple en visitant les deux sorties, amont et aval, des Grandes Cabanes - Figure 27, ou la sortie aval des Grandes Cabanes et l'embouchure du canal du Fumemorte -

Figure 30, et Figure A117). Une analyse par clustering des déplacements des individus entre les différents secteurs a mis en évidence la diversité des enchainements (Raynard 2025).

Par ailleurs, alors que certains individus ont transité rapidement entre différents secteurs, d'autres se sont longuement attardés. Par exemple, les individus s'échappant par le Petit Rhône ont mis des temps très différents pour parcourir le trajet de plusieurs kilomètres (sans présence d'ouvrage de connexion) entre les hydrophones amont et aval. Entre la dernière détection à l'hydrophone de l'amont du Petit Rhône et la première détection à l'hydrophone de l'embouchure du Petit Rhône, un individu a mis seulement 6 h 32 min (#15603550191, le 31 janvier 2025), tandis qu'un autre a mis 37 jours et 20 h 23 (#15603550269, le 18 décembre 2025, Figure 34).

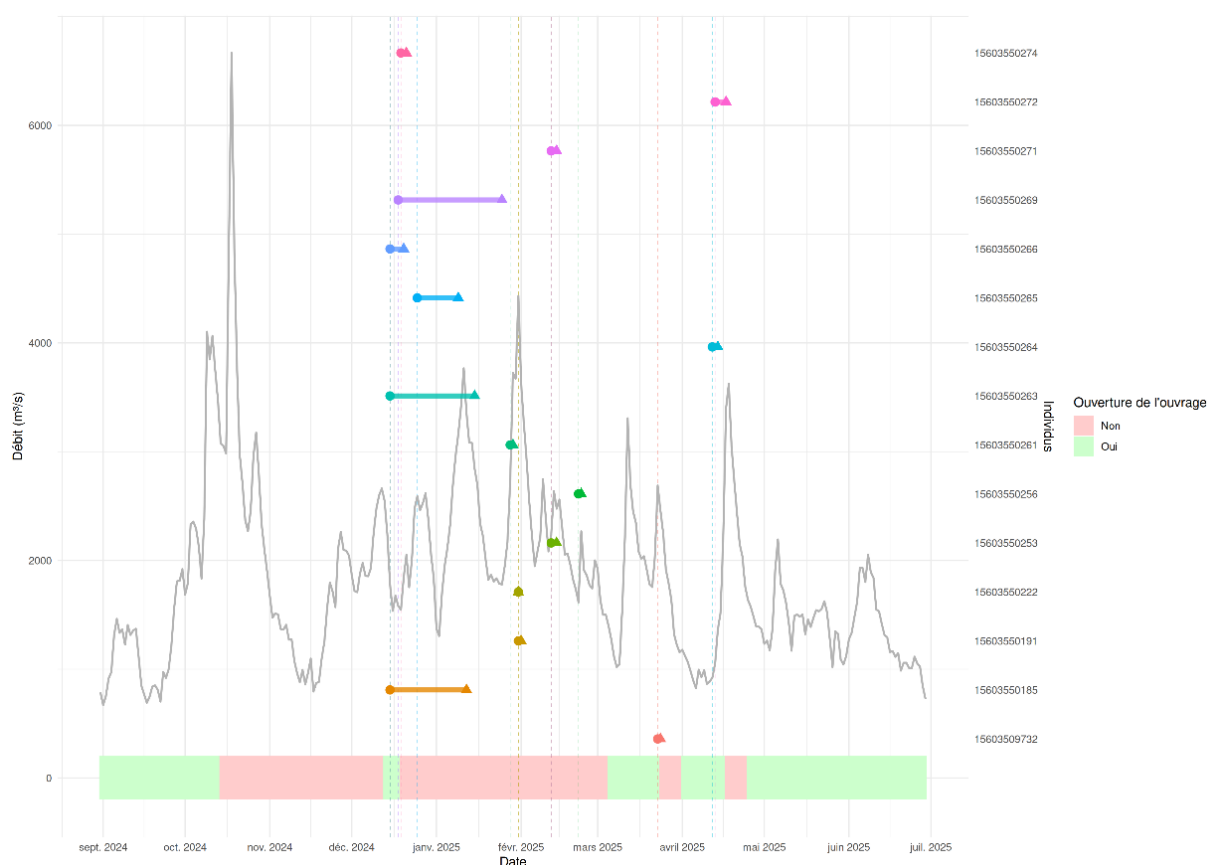


Figure 34 : Débit du Petit Rhône au cours du temps (gris) et date de début (date de la dernière détection à l'hydrophone amont du Petit Rhône) et de fin (date de la première détection à l'hydrophone aval du Petit Rhône) de l'échappement des individus (en couleur et par numéro de leur émetteur) *via* le Petit Rhône. La barre horizontale en bas informe sur l'ouverture (vert) et fermeture (rouge) de l'ouvrage de connexion entre la prise d'eau du bassin des Grandes Cabanes et le Petit Rhône. Les anguilles ont été marquées en acoustique en novembre 2024 (n=61).

Détection d'un acte de prédation

Lors de la deuxième année de suivi, 40 anguilles argentées femelles (sur les 80 marquées au total) ont été équipées d'un émetteur acoustique intégrant un capteur de prédation. Plus en détails, 27 individus du bassin des Grandes Cabanes sur les 61 marquées en acoustique avaient un capteur de prédation, et 13 sur les 19 marquées dans le canal du Fumemorte. Sur ces 40 individus marqués, 39 ont été entendus au moins une fois par un hydrophone (Figure A117).

Seulement un seul individu marqué le 5 novembre 2024 aux Grandes cabanes (l'individu #15603550003 : 83.2cm, 1.2kg, stade FIV) a été prédaté (Figure 35). Peu de temps après son relâché, cet individu a été d'abord détecté tout à l'aval (Figure 35). De fin novembre à fin janvier 2025, l'individu est ensuite détecté à plusieurs reprises à proximité de la prise d'eau au Petit Rhône, alors que la martelière du Petit Rhône était fermée (sauf à sa détection du 14 décembre 2024). Fin janvier, après

[illegible]

Discussion générale

Dans le cadre du projet COLAGANG, les anguilles associées à deux bassins camarguais dominés

La pêche électrique est une méthode scientifique fréquemment utilisée pour échantillonner les peuplements piscicoles dans les milieux d'eau douce peu profonds. L'avantage de cette méthodologie est double, elle permet de capturer des individus qui ne sont pas forcément très mobiles et sur une surface connue permettant d'estimer des densités. Mais cette technique fonctionne dans les milieux où la conductivité est faible (entre 0.015 et 2 mS/cm). La pêche électrique n'a pas pu être utilisée dans le canal du Fumemorte, du fait de la profondeur trop élevée (>1 m) et d'une conductivité

trop élevée (5,5 mS/cm en moyenne entre 2019 et 2025). En revanche, 4 journées de pêche électrique ont été réalisées par an à quatre stations du bassin des Grandes Cabanes. Le nombre de captures par pêche électrique s'est avéré très variable au cours du temps et bien moindre par rapport à celui aux filets (de 0 à 75 individus en mars 2023, Figure A59). Néanmoins, la pêche électrique a permis de faire de nombreuses recaptures qui n'ont jamais été faites aux filets. Ces recaptures étaient particulièrement intéressantes étant donné l'ancienneté du premier marquage. La plus abondante capture d'anguilles en pêche électrique a eu lieu en novembre 2025 à la seule station de Costières (Figure 10, données non incluses dans ce rapport). Un total 95 individus y ont été capturés, et 19 d'entre eux étaient des recaptures, dont 7 de 2023 et 4 de 2022. Les recaptures anciennes sont particulièrement intéressantes pour étudier la croissance des individus. En perdurant ce suivi en CMR, nous pouvons nous attendre à avoir des recaptures encore plus anciennes dans les années à venir. Ces résultats de recaptures d'individus soulignent l'intérêt complémentaire de la méthode de pêche électrique avec celle aux filets.

Les recaptures en CMR permettent d'estimer un taux de croissance entre deux captures et d'informer sur l'âge relatif de l'individu à partir de sa date de marquage. Toutefois, elles ne permettent pas d'âger les individus et d'étudier en continu le taux de croissance, contrairement à l'otolithométrie. Dans ce projet, l'utilisation de l'otolithométrie a ainsi permis d'obtenir un âge moyen des anguilles argentées femelles pour différents types d'habitat (Annexe 7). Les anguilles argentées femelles des Grandes Cabanes ont été âgées en moyenne de 6 ans ($n=18$), tandis que les anguilles du canal du Fumemorte de 10 ans ($n=27$). Ces résultats n'ont pas soutenu l'hypothèse selon laquelle les anguilles des Grandes Cabanes étaient piégées, avant même la reconnexion de ce bassin avec l'étang du Vaccarès. De plus, grâce à l'étude de la microchimie de ces otolithes, les tactiques d'utilisation de l'habitat chez les individus échantillonnés ont été identifiés dans le cadre de la thèse d'Amélie Hoste (2024).

Le projet COLAGANG a aussi été l'opportunité de mettre au point des dispositifs de télémétrie capable de fonctionner dans des milieux relativement profonds (> 30 cm), larges (> 10 m) et influencés par des variations de la salinité. Le suivi en télémétrie RFID a permis de suivre le déplacement d'un grand nombre d'individus marqués ($n=3078$ en 23 mm) aux sorties des deux bassins ciblés. Le suivi en télémétrie acoustique a permis d'étudier le déplacement d'un nombre plus limité d'individus, mais sur une plus grande zone d'étude, de l'intérieur des bassins ciblés jusqu'aux portes de la mer de l'hydrosystème du Vaccarès et à l'embouchure du Petit Rhône. Les connexions à la mer de l'hydrosystème du Vaccarès, qui sont en général peu profondes et étroites, peuvent être équipées de portiques RFID. D'ailleurs, le chenal de la Comtesse a été équipé en 2024 et le chenal de la Fourcade devrait l'être en 2026 (actions de l'association MRM). En revanche, le Petit Rhône, milieu très large et très profond, n'est pas du tout adapté pour cette technologie mais la télémétrie acoustique peut être utilisée (Annexe 15). Ainsi, les technologies RFID et acoustique sont des méthodes complémentaires pour étudier le déplacement des anguilles à l'échelle du delta de Camargue.

Phénologie de l'échappement

La phénologie de l'échappement a été caractérisée à partir des détections RFID d'anguilles argentées, sans considérer les différences entre sexe. Sachant que 87% des individus argentés marqués et détectés aux sorties des bassins étudiés étaient des femelles, les résultats obtenus caractérisent essentiellement la phénologie des femelles. En première exploration, aucune différence de temporalité d'échappement ne semblait ressortir entre les mâles et les femelles (Figure A96).

La période d'échappement des anguilles argentées a eu lieu en fin d'automne voire début de l'hiver au printemps avec des variations entre les sites étudiés. Dans le bassin des Grandes Cabanes, deux pics d'échappement ont été mis en évidence. Le premier pic fut au début de l'hiver (novembre pour GC Aval et décembre pour GC Amont) et le second au printemps (mars-avril). Dans le bassin du Fumemorte, bien qu'une augmentation de l'échappement ait été détectée en décembre-janvier, le pic a été obtenu en février-mars, soutenant une migration plus tardive des anguilles. Cette période

secondaire a déjà été mise en évidence dans d'autres sites tels que des lagunes méditerranéennes (Ciccotti and Morello 2023, Le Gallou et al. 2025), des rivières ou fleuves en France (Briand et al. 2020) et plus largement en Europe (Feunteun et al. 2000, Aarestrup et al. 2008, Acou et al. 2008). Dans certains sites, la dévalaison a même lieu en juillet (Charrier et al. 2022). Les décalages de pic d'échappement entre les différents sites, surtout à différente latitude, a déjà été souligné (Brujis and Durif 2009). Les auteurs suggèrent que cette variation saisonnière de l'échappement pourrait être liée à la distance entre les habitats de croissance et le site de reproduction, favorisant ainsi une synchronisation de l'arrivée des géniteurs issus de différentes régions géographiques sur le site de reproduction. Cependant, dans notre étude, l'échelle latitudinale est très restreinte, ainsi nos résultats ne soutiennent pas cette hypothèse. Des facteurs plus locaux tels que des variations de paramètres environnementaux (Trancart et al. 2017) devraient probablement expliquer le déclenchement de l'échappement et donc les décalages présents à plus fine échelle.

Des variations interannuelles de l'échappement des anguilles ont été mise en évidence. En effet, nos résultats ont montré que dans le cas de l'échappement par GC-Amont, *via* le Petit Rhône, l'année 2023-2024 a été la meilleure année parmi les 3 années de suivi. Cependant, cet effet interannuel peut dépendre de nombreux facteurs tels que l'efficacité de capture-marquage, les conditions environnementales, ou la structure d'âge des autres stades de la population d'anguilles (Amilhat et al. 2008). Il est nécessaire de poursuivre ces suivis sur plusieurs d'années afin de mieux discriminer les variabilités observées. De plus, les variations observées entre sites pourraient s'expliquer, en partie, par l'influence de certains facteurs environnementaux.

Influence des variables environnementales

L'échappement des anguilles est fortement influencé par un patron saisonnier, avec un fort effet négatif de la température sur le nombre d'anguilles cherchant à s'échapper du système quel que soit le site étudié. Dans une moindre mesure, d'autres facteurs comme la phase lunaire ont une influence sur l'échappement des anguilles. Par exemple, l'échappement à GC-Aval a été favorisé aux périodes de faibles températures (hiver) et lors des nouvelles lunes (obscurité importante). Ces effets environnementaux ont déjà été montré lors de l'étude de l'échappement d'anguilles dans d'autres sites (Durif et al. 2002, Cullen and McCarthy 2003, Sandlund et al. 2017). Cependant, la phase lunaire n'a eu que peu d'influence sur l'échappement des anguilles dans les deux autres sites étudiés. Pourtant, le pêcheur professionnel localisé dans l'étang du Vaccarès, à proximité immédiate de la station Fume-Aval, nous avait bien indiqué que la capture des anguilles argentées était plus importante lors de la nouvelle lune et d'un fort vent de secteur N-O (mistral). D'après nos résultats, l'échappement des anguilles argentées à la station Fume-Aval fut en effet influencé par le vent N-O, mais aucun effet de la lune n'a été mis en évidence. Cela rejoint le constat d'autres études où le cycle lunaire n'avait pas d'effet sur l'échappement (Le Gallou et al. 2025).

Les conditions environnementales ayant été fortement contrastées durant les deux ou trois années de suivi, il est difficile de discriminer les effets environnementaux des effets saisonniers. Cette migration ayant lieu d'automne au printemps, il serait intéressant de se focaliser uniquement sur cette période afin d'étudier plus précisément les effets des variables environnementales sur la dynamique d'échappement.

De plus, certaines variables d'intérêt, telles que les débits (au niveau de la prise d'eau du Petit Rhône, aux embouchures du bassin des Grandes Cabanes et du canal du Fumemorte) n'ont pas pu être testées par manque de données. D'autres effets non linéaires auraient pu également être recherchés en tant que facteurs déclencheurs de la migration, tels que le passage de valeurs seuils ou une variation du niveau d'eau (augmentation ou diminution). Par exemple, les températures inférieures à 6°C ou supérieures à 18°C pourraient être des valeurs seuils indiquant un ralentissement du métabolisme des anguilles argentées (Vøllestad et al. 1986, Durif et al. 2002, Acou et al. 2008). Et dans le lac de Grand Lieu, c'est une variation du niveau d'eau qui avait été identifiée déterminante pour le déclenchement de la dévalaison (Trancart et al. 2017). Nos résultats ont montré une influence du vent, du débit du

Rhône, et du niveau d'eau sur la détection des anguilles argentées. Ces effets suggèrent qu'une mise en mouvement de l'eau, expliquée par différents facteurs en fonction des sites, pourrait également être déterminante pour déclencher l'échappement des anguilles argentées. Il serait nécessaire de poursuivre ce suivi afin d'inclure des nouvelles variables environnementales locales et d'acquérir plus de données afin de mieux comprendre les potentiels facteurs environnementaux influençant l'échappement.

Un effet piège de la poldérisation non concluant

En début de projet, le bassin des Grandes Cabanes était encore poldérisé. Le premier objectif du projet visait ainsi à étudier l'impact de cette poldérisation sur le devenir des anguilles : l'hypothèse étant que les anguilles argentées étaient piégées, sans possibilité d'échappatoire vers la mer. Dans ce cas, les anguilles argentées de ce site étaient supposées être plus âgées que dans les sites non poldérisés. Or, la lecture d'âge par otolithométrie a montré que les anguilles femelles argentées du bassin des Grandes Cabanes étaient plus jeunes que celles du canal du Fumemorte, un bassin non poldérisé (6 ans et 10 ans en moyenne, respectivement). Au moment de l'étude, le seul exutoire des anguilles des Grandes Cabanes était le canal de l'ASA de la Sigoulette. Ce dernier était connecté au Petit Rhône par une station de pompage, ne permettant pas le passage des anguilles argentées (Lambremon and Rivoallan 2021). Pourtant, même les anguilles femelles argentées capturées dans le canal de l'ASA de la Sigoulette, système *a priori* clos, ont été âgées, en moyenne, de 2 ans de moins que celles provenant du canal du Fumemorte. L'analyse de l'âge des anguilles n'a donc pas permis de mettre en évidence un effet de piégeage de ce système poldérisé.

La reconnexion du canal de drainage de l'ASA de la Sigoulette à l'étang du Vaccarès, dès la première année de suivi de l'échappement par télémétrie RFID (2022-2023), dans le cadre de la mise en œuvre du plan de sauvegarde de l'étang du Vaccarès (Ricque et al. 2025), n'a pas non plus permis d'étudier cet effet.

Une connexion restaurée qui joue son rôle de corridor écologique

Depuis juin 2023, les eaux du bassin des Grandes Cabanes s'écoulent gravitairement dans l'étang du Vaccarès *via* un canal restauré. Avant les travaux de restauration, aucune anguille marquée n'avait été détectée dans ce canal. En revanche, dès l'automne 2023, de nombreuses détections ont été enregistrées à la station RFID de cette reconnexion, indiquant que l'utilisation de cette nouvelle voie de passage par les anguilles. Depuis, chaque année, entre 61 et 79% des anguilles argentées marquées utilisent cette nouvelle voie pour sortir du bassin des Grandes Cabanes.

La voie d'échappement du Petit Rhône : un cheminement inverse insoupçonné

Dès le début du projet (2022-2023), un nombre de détections conséquent a été enregistré à la station RFID au niveau de la prise gravitaire au Petit Rhône suggérant qu'une partie des anguilles argentées des Grandes Cabanes (22%) ont remonté le canal d'alimentation pour chercher à rejoindre la mer *via* le Petit Rhône. Cette proportion d'anguilles argentées cherchant à emprunter la voie du Petit Rhône fut d'ailleurs relativement constante (entre 21 et 39%) les années suivantes, malgré la reconnexion avec l'étang du Vaccarès.

Avec l'installation de deux hydrophones supplémentaires dans le bras du petit Rhône, la deuxième année du suivi en télémétrie acoustique (2024-2025) a permis de confirmer la fonctionnalité de la voie d'échappement *via* le Petit Rhône (Figure A119). En effet, au moins 15 anguilles argentées femelles provenant des Grandes Cabanes sont parvenues à franchir l'ouvrage de connexion avec le Petit Rhône et ont été détectées à l'aval du Petit Rhône, au niveau de l'embouchure avec la mer. Par conséquent, il n'est plus possible de considérer que le bassin des Grandes Cabanes ait été un système fermé pour les anguilles, même avant les travaux de reconnexion. Il est possible qu'une partie des individus (environ un tiers, d'après nos résultats) ait toujours cherché à emprunter cette voie du Petit Rhône pour s'échapper. Cependant, les autres individus (deux tiers restants) pouvaient chercher à s'échapper par le canal de l'ASA de la Sigoulette et finalement s'y retrouvaient potentiellement piégés.

Cette question n'a pas pu être investiguée du fait de la reconnexion dès la première année de suivi RFID entre le canal de l'ASA de la Sigoulette et l'étang du Vaccarès.

Ces résultats inédits montrent qu'il est possible que des anguilles argentées remontent le courant d'eau douce pour trouver un échappatoire, ici le Petit Rhône. Les très faibles débits de ce système pourraient expliquer ces comportements. Une autre hypothèse est que les individus utilisent la voie par laquelle ils ont été recrutés. En effet, du moins jusqu'à la reconnexion avec l'étang du Vaccarès, la plupart des anguilles des Grandes Cabanes ont été recrutées en passant par le Petit Rhône, puis le canal de la Pigeonnière. Toutefois, une fois argentées, la plupart des individus semblent davantage choisir l'échappement par l'étang du Vaccarès, chaque année.

La voie de l'hydrosystème du Vaccarès : une voie privilégiée mais peu fonctionnelle

Bien que la majorité des anguilles argentées marquées (en RFID ou en acoustique) aux Grandes Cabanes se sont échappées en direction de l'étang du Vaccarès (~70%), aucune des anguilles détectées en aval des Grandes Cabanes n'est parvenue à franchir l'un des deux passages clés pour rejoindre la mer, le pertuis de la Fourcade ou le pertuis de la Comtesse. Sur les 12 individus qui s'échappent du canal du Fumemorte, seuls deux y parviennent. Finalement, moins de 2% des individus marqués en télémétrie acoustique ont réussi à sortir de l'hydrosystème du Vaccarès par ces voies. Aucune de ces deux voies, *via* le pertuis de la Fourcade ou le pertuis de la Comtesse, n'a été davantage utilisée que l'autre. Globalement, la voie d'échappement par l'hydrosystème du Vaccarès est apparue très peu fonctionnelle sur les deux années de suivi en télémétrie acoustique, même si les conditions environnementales ont été très contrastées (Figure A119).

Les obstacles à l'échappement

Les conditions environnementales extrêmes

Du fait de conditions météorologiques exceptionnellement chaudes et sèches (Figure 8), l'année 2023-2024 a été marquée par des pertes de connectivité entre l'étang du Vaccarès et les étangs inférieurs, dues à l'apparition de zones asséchées (Annexe 19) et/ou hypersalées. D'ailleurs, cette année-là, les pêcheurs professionnels de l'étang des Impériaux n'ont quasiment pas pu pêcher, n'ayant pas suffisamment de hauteurs d'eau pour poser leurs filets. Pour éviter la sursalinisation de l'hydrosystème du Vaccarès, le pertuis de la Fourcade est, de plus, resté fermé pendant quasiment toute la saison d'échappement des anguilles argentées (Figure A46). Cette année-là, sur les 28 individus détectés dans l'étang du Vaccarès, uniquement 2 ont été détectés à un des pertuis. Ces résultats pourraient s'expliquer par les conditions environnementales défavorables au retour en mer des anguilles argentées *via* l'hydrosystème du Vaccarès.

Face à ces conditions, les anguilles ont probablement tourné dans le système en tentant de trouver une sortie. Neuf sur les 41 individus (soit 22%) marqués en acoustique cette année-là ont été recapturés par des pêcheurs professionnels dans l'étang du Vaccarès. Ce taux de recapture pourrait paraître très élevé en comparaison de la taille de ce système, néanmoins ces pêcheurs étaient positionnés à proximité des embouchures des deux bassins étudiés, et les recaptures ont le plus souvent eu lieu immédiatement après une détection à l'un des hydrophones placés à l'aval de ces bassins (Figure A116). Par ailleurs, l'analyse comparative des parcours effectués entre les deux années de suivi acoustique n'a pas permis de mettre en évidence un comportement plus exploratoire la première année. L'ajout d'hydrophones à l'intérieur de l'hydrosystème du Vaccarès permettrait de mieux comprendre les déplacements et les comportements des anguilles argentées migrantes.

L'année 2024-2025 a été, au contraire, marquée par des conditions bien plus humides (Figure 8), et les niveaux d'eau et les degrés de salinité enregistrés (SNPN, pers. com.) permettaient d'espérer de meilleures conditions pour le transit des anguilles entre l'étang du Vaccarès et les connexions à la mer. Néanmoins, aucun individu des Grandes Cabanes n'y est parvenu et seul un provenant du canal du Fumemorte a passé le pertuis de la Comtesse. Ces résultats interrogent sur l'identification des facteurs freinant l'échappement des anguilles. Entre novembre 2024 et janvier 2025, 13 individus

marqués en RFID dont 2 en acoustique ont été détectés par l'antenne RFID placée chez le mareyeur EUROGEAL (action MRM, Annexe 17), soulignant l'importance de collaborer avec les pêcheurs professionnels afin de mieux comprendre le devenir des anguilles argentées dans cet hydrosystème. En 2024-2025, le marquage des individus fut un peu moins visible ce qui a dû complexifier l'identification de ces individus par les pêcheurs professionnels (Annexe 17).

Les ouvrages de connexion

L'hydrosystème du Vaccarès présente une mosaïque d'habitats, qui peut s'avérer être un vrai labyrinthe pour les anguilles qui cherchent à rejoindre la mer. De plus, le fonctionnement hydrologique de ce système est largement contrôlé par de multiples ouvrages de connexion tels que des buses, des martelières ou des stations de pompage. Chacun de ces ouvrages peut représenter un obstacle pour l'échappement des anguilles (Lambremon and Rivoallan 2021). D'une part, la présence d'une structure massive sur le cours d'eau peut effrayer les anguilles. Les détections acoustiques ont permis de constater que certains individus n'ont pas franchi un ouvrage alors que celui-ci était ouvert. D'autre part, la fermeture des ouvrages représente un réel frein à l'échappement des anguilles. Plusieurs individus ont séjourné ou sont revenus à plusieurs reprises à l'amont de l'ouvrage de connexion au Petit Rhône, en attendant une ouverture (Figure 34, Figure 35 et Figure A117). Dans les trois cas où un individu est parvenu à l'un des deux pertuis, l'échappement a été empêché (Figure 27) ou retardé de 3 jours (Figure 31) ou d'un mois (Figure 30) du fait de la fermeture des vannes. Ainsi, la présence des ouvrages de connexion peut empêcher le passage des individus migrants de manière directe ou indirecte, et entraîner en plus un temps d'attente en amont de l'ouvrage. Ce temps d'attente pourrait impacter la survie et/ou le succès reproducteur de l'individu en accroissant le risque de prédation au niveau de l'ouvrage, l'amoindrissement des ressources pour effectuer la migration en mer et devenir mature et/ou un retard pour rejoindre le site de reproduction à temps.

Dans certains cas, il semblerait que les anguilles soient parvenues à franchir un ouvrage, alors que celui-ci était fermé. C'est le cas de 6 individus qui ont été détectés s'échapper des Grandes Cabanes par le Petit Rhône, alors que la martelière de la connexion était fermée (Figure 34). Plusieurs explications sont possibles : (i) certaines manipulations d'ouvrages n'ont pas été renseignées, (ii) l'ouvrage n'est pas hermétique, une fuite au niveau de la martelière pourrait permettre le passage d'individus, (iii) du fait du chevauchement entre les portées de détection des hydrophones placés de part et d'autre de l'ouvrage, il pourrait s'agir d'une mauvaise interprétation des données. En effet, les hydrophones ont été placés en priorité pour assurer la détection du passage d'un individu à un secteur donné (Annexe 16). Ainsi, il est possible qu'un individu soit détecté par l'hydrophone situé à l'aval d'un ouvrage alors que celui-ci est localisé à l'amont. C'est, d'ailleurs, ce qui a été observé pour l'individu ayant séjourné pendant un mois à l'amont du pertuis de la Fourcade. Ces résultats ont permis d'initier une réflexion sur la disposition et le potentiel ajout d'hydrophones afin de s'assurer du franchissement d'un ouvrage par un individu à partir des détections acoustiques.

La prédation

En Camargue, la prédation aviaire sur l'anguille est conséquente, notamment du fait des ardéidés (hérons, aigrettes) et des cormorans (Feunteun and Marion 1994, Carpentier et al. 2009). Des observations directes témoignent également d'actes de prédation du silure glane et de la couleuvre sur l'anguille. Le silure glane étant très abondant dans les marais et canaux d'eau douce camarguais (Panfili et al. 2024), son impact en tant que prédateur sur l'anguille interroge. Les anguilles argentées migrantes étant particulièrement mobiles, elles ont probablement davantage de risques d'être prédatées par le silure, d'autant plus lorsque celles-ci sont bloquées devant un ouvrage de connexion fermé (Trancart et al. 2023).

Durant la deuxième année de suivi, 40 émetteurs équipés d'un capteur de prédation ont été utilisés pour vérifier notamment l'incidence de la prédation par le silure glane. Seul un acte de prédation a été détecté, probablement par un silure. Cet acte a concerné un individu qui avait exploré différentes voies de sorties (Figure 35 et Figure A118). Ce résultat ne permet pas d'attester que le silure a eu un fort impact de prédation sur les anguilles argentées supérieures à 60 cm. Cette étude

mériterait toutefois d'être approfondie, puisque seulement 33% des émetteurs utilisés pour le suivi acoustique étaient équipés d'un capteur de prédation. De plus, même si densifié la deuxième année, le réseau d'hydrophones déployé n'était peut-être pas suffisamment dense pour détecter d'éventuels autres actes de prédation. En effet, l'émetteur ingurgité ne reste pas très longtemps dans le corps du prédateur, et pour que l'acte soit enregistré, il est nécessaire que le prédateur passe dans le champ de détection d'un hydrophone. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'équiper davantage d'individus, avec un spectre de taille plus large pour mieux étudier la prédation du silure sur l'anguille, comme il est d'ailleurs fait dans le cadre du projet Seelure en Loire Atlantique (projet en cours du MNHN). A l'avenir, l'équipement en hydrophones des bras du Rhône pourraient permettre également d'étudier la prédation de l'anguille par d'autres poissons top-prédateurs tels que les thons.

Préconisation de mesures de gestion

Les résultats de ce projet mettent en avant des problématiques de continuité écologique à l'intérieur de l'hydrosystème du Vaccarès. Les conditions de sécheresse extrêmes rencontrées durant l'année 2023-2024 et les années précédentes (Figure 8) devraient se produire plus fréquemment dans les années à venir (Boutron et al. 2021). Afin de limiter les assècs, l'hypersalinité et la fermeture des pertuis, il devient urgent de reconnecter cet hydrosystème deltaïque à son fleuve pour bénéficier d'apports d'eau douce conséquents. Grâce au plan de sauvegarde du Vaccarès, plusieurs projets devraient voir prochainement le jour pour acheminer directement de l'eau du Rhône dans ce système (Ricque et al. 2025). Par ailleurs, d'importants travaux vont être réalisés en 2026 et 2027 sur le pertuis de la Fourcade par le SYMADREM afin de le dédoubler et de créer une nouvelle passe à poissons. Cette passe à poissons permettrait d'optimiser les échanges hydrobiologiques entre la mer et les étangs, et pourrait assurer l'échappement des anguilles argentées. Toutefois, l'ouverture de cette passe dépendra des différences de niveaux d'eau entre la mer et les étangs et de la salinité côté étangs. Le niveau de la mer continuant à monter, il y a un risque que la passe reste fermée pour éviter de faire entrer davantage d'eau de mer dans les étangs et d'accroître la salinisation. Une modélisation globale du fonctionnement hydrologique de l'hydrosystème du Vaccarès permettrait de tester différents scénarios de gestion et envisager les conséquences en termes de risque d'inondation, de salinisation et de continuité écologique. Cet outil constituerait une aide à la décision pour adopter les mesures de gestion optimales pour assurer davantage le retour en mer des anguilles argentées. De plus, il est nécessaire d'évaluer la franchissabilité de cette future passe à poissons pour s'assurer de sa fonctionnalité.

D'après nos résultats, l'échappement des anguilles argentées serait optimisé en garantissant l'ouverture des ouvrages de connexion la plus fréquente entre novembre et avril. Ces ouvrages de connexion ne concernent pas seulement les premiers ouvrages à la mer, mais l'ensemble des ouvrages qui se trouvent sur une voie permettant de rejoindre la mer, que ce soit *via* un passage amont ou aval. Il peut être compliqué pour les gestionnaires d'assurer une ouverture de leurs ouvrages sur une aussi longue période. En poursuivant les suivis en télémétrie de l'échappement des anguilles sur davantage d'années, les conditions environnementales favorisant le déplacement des anguilles pourraient être étudiées à plus fine échelle. Plus les signaux de déclenchement de l'échappement seront connus et donc prévisibles localement, plus il sera possible de procéder à de fines manipulations des ouvrages.

En complément, les détections acoustiques ont montré que plusieurs anguilles marquées ont passé des ouvrages alors qu'ils étaient a priori fermés. D'autres, au contraire, même lorsqu'un ouvrage était ouvert, ne sont pas passées. Il serait donc intéressant d'étudier davantage les conditions qui favorisent au mieux la franchissabilité des ouvrages, en termes de durée et de degré d'ouverture des martelières, en fonction des paramètres hydrologiques (débit, hauteur d'eau). La configuration des ouvrages de connexion, tels que leur longueur et leur largeur, pourraient également être plus ou moins favorables au passage des anguilles. Ces résultats pourraient permettre d'identifier des petits aménagements tels que des rampes ou des ouvertures en surface qui favoriseraient davantage le passage d'individus.

Actuellement, la seule voie d'échappement pour les anguilles du canal du Fumemorte est l'embouchure dans l'étang du Vaccarès. Dans ce projet, les deux seules anguilles qui sont parvenues aux pertuis de la Fourcade ou de la Comtesse provenaient de ce canal. Si la circulation des eaux du Fumemorte est détournée comme le prévoit le projet du Fournelet, il y a un risque de perte de continuité pour les anguilles associées à ce site. A l'actuel embouchure du canal du Fumemorte, il est prévu d'installer un barrage avec une turbine pour assurer l'écoulement des eaux en direction de l'étang du Vaccarès en cas d'inondations. Or, une crue du canal pourrait être un signal fort pour l'échappement des anguilles argentées. Cette turbine doit donc être conçue pour garantir la survie des poissons lors de leur passage.

Conclusion & Perspectives

Le projet COLAGANG a permis de mieux appréhender la période et les voies utilisées lors de l'échappement des anguilles argentées. La voie privilégiée est celle qui passe par l'étang du Vaccarès, bien que celle-ci s'est avérée peu fonctionnelle. Finalement, pour les anguilles des Grandes Cabanes, la voie qui passe par le Petit Rhône s'est révélée au contraire plus fiable. L'ensemble de nos résultats ont souligné la grande variabilité des comportements individuels, illustrant une stratégie adaptative forte chez l'anguille. Cette diversité comportementale constitue vraisemblablement un mécanisme clé de robustesse chez cette espèce.

Ce projet s'est focalisé uniquement sur l'échappement des anguilles associés à des milieux d'eau douce. Les résultats caractérisent essentiellement la phénologie et le comportement migratoire d'anguilles argentées femelles. Davantage de suivis sont nécessaires pour mieux appréhender les variabilités inter- et intra-annuelles de l'échappement et mieux identifier les facteurs environnementaux qui le déclenchent. Par ailleurs, obtenir au moins 10 ans de données de capture-marquage-recapture (CMR) pour les deux sous-populations des bassins des Grandes Cabanes et du Fumemorte permettra d'étudier et de comparer leurs traits d'histoire de vie (taux de survie, taux de croissance, durée d'argenture, sexe) et leur dynamique (abondance par stade, production d'anguilles argentées). Enfin, pour caractériser l'échappement des anguilles à l'échelle de l'hydrosystème du Vaccarès, il est indispensable d'étudier les anguilles associées aux milieux plus salés, tels que l'étang du Vaccarès, qui produisent essentiellement des mâles argentés (Acou et al. 2003, Hoste 2024). Une suite à ce projet est donc actuellement envisagée.

Dans la continuité du projet COLAGANG, le projet COLAGANG II viserait à caractériser la dynamique d'échappement à l'échelle de l'hydrosystème du Vaccarès. Ce nouveau projet intégrera les actions menées par la Tour du Valat, l'OFB (projet COLAGANG 1), ainsi que les actions menées par l'association MRM et la SNPN. En 2024, l'Association MRM a déjà équipée le chenal de la Comtesse avec deux antennes RFID. Suite à une étude de faisabilité réalisée en 2025, MRM se chargera d'équiper le chenal en amont du pertuis de la Fourcade avec un nouveau dispositif RFID en 2026. Ainsi, en 2026, les deux pertuis du système Vaccarès seront équipés d'une station d'écoute RFID. Dans ce contexte, il sera possible d'étudier la dynamique de l'échappement des anguilles argentées du bassin des Grandes Cabanes, du canal du Fumemorte et de l'étang du Vaccarès jusqu'à ces portes de la mer. Avec notamment l'appui de la SNPN, la continuité écologique à l'intérieur du delta sera mieux caractérisée pour identifier plus précisément les obstacles à l'échappement. Ce nouveau projet permettrait donc d'évaluer la continuité à l'échelle de l'hydrosystème Vaccarès, notamment avec l'actualisation de la bathymétrie du système, dans le contexte du Plan de Sauvegarde du Vaccarès et de la réfection prochaine du pertuis de la Fourcade.

Par ailleurs, les acteurs et gestionnaires s'inquiètent de l'arrivée de l'invasif crabe bleu en Camargue. La mise en place du réseau d'hydrophones pour suivre la dévalaison de l'anguille pourrait permettre de suivre, dans le même temps, les déplacements du crabe bleu dans le système Vaccarès. Ce suivi permettrait de connaître les périodes de migration des femelles (quand elles entrent ou

sortent du système) et d'identifier d'éventuelles zones de concentration des mâles (au niveau des arrivées d'eau douce). Ces résultats aideraient les gestionnaires dans la mise en place de mesures de gestion (barrière sélective, opération de pêche coup de poings, etc.). Ainsi, les moyens déployés pour l'acquisition et l'entretien des hydrophones pourraient être mutualisés pour répondre à deux questions relatives à des enjeux de la connectivité écologique.

Communication

Les différentes opérations de communication sont exposées en Annexe 20. Deux petits films ont été réalisés, le premier au début du projet pour présenter les objectifs (disponible à ce [lien](#)), et le deuxième en fin de projet pour présenter les principaux résultats (bientôt disponible en ligne). Ces vidéos sont destinées à tout public.

Remerciements

L'équipe COLAGANG tient à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de ce projet, que ce soit en nous soutenant financièrement, en nous conseillant à distance, en participant à des missions sur le terrain, en nous prêtant du matériel ou simplement en partageant un vif intérêt.

Annexe 1 – Présentation des deux sites d'étude : suppléments d'informations

La Camargue est alimentée en eau douce d'avril à octobre essentiellement *via* le pompage du Rhône pour l'irrigation agricole (Heurteaux 1969, Poizat et al. 1999). L'étang du Vaccarès et les étangs inférieurs n'ayant pas la capacité suffisante pour drainer la totalité du volume pompé sans risquer des inondations, de plus en cas de fortes pluies automnales, la majorité des canaux de drainage sont poldérisés : l'eau de drainage retourne au Rhône par pompage (Chauvelon 1996, 1998).

Le bassin du Fumemorte

Le projet cible en premier lieu le bassin du Fumemorte qui couvre une superficie de 68 km² à l'Est du delta du Rhône (Figure A36). Le Fumemorte est le principal apport d'eau douce de l'Etang du Vaccarès (Chauvelon 1998) qui constitue le cœur de la Réserve Naturelle Nationale de Camargue (RNNC). La RNNC est classée en « **zones humides** » des « **réservoirs de biodiversité** » de la **trame bleue du SRCE PACA**. Ce territoire comprend la plus grande partie de la **masse d'eau de transition « Camargue Complexe Vaccarès »** (FRDT14a), identifiée parmi les milieux aquatiques fragiles vis-à-vis des phénomènes d'eutrophisation. Le bassin du Fumemorte est constitué d'une mosaïque d'habitats (parcelles agricoles, prairies, marais temporaires, roubines, canaux, etc.), dont une partie est intégrée à la **Réserve Naturelle Régionale de la Tour du Valat**.

Le bassin du Fumemorte représente 55% de la surface **non-poldérisée** du delta de Camargue (entre les deux bras du Rhône). Son fonctionnement hydrobiologique dépend, en amont de l'apport en eau douce pompée dans le Grand Rhône pour l'irrigation (15 stations de pompage au total), et, en aval, des échanges avec l'étang du Vaccarès et, plus indirectement, avec les étangs inférieurs et la mer.

L'Association Syndicale Autorisée (ASA) du Fumemorte a lancé une réflexion avec les acteurs locaux (OFB, SNPN, Tour du Valat, propriétaires, etc.), ainsi qu'une étude pilote entre 2022 et 2025, pour envisager des solutions permettant d'améliorer la qualité des eaux de drainage. Dans les scénarios envisagés, une poldérisation complète ou partielle pourrait être choisie, ce qui pourrait nuire à la connectivité écologique.

Le canal du Fumemorte collecte les eaux de drainage d'un réseau de 400 km de long (Figure A36). Il fait 14,6 km de long pour une largeur de 14 m en moyenne et a une profondeur qui varie entre 0,5 et 2,5 m de profondeur (Poulet 2004). Ce canal présente une diversité de substrats intéressante pour la faune aquatique, avec un fond meuble envasé, des embâcles de bois et surtout des berges densément végétalisées, plus ou moins ombragées.

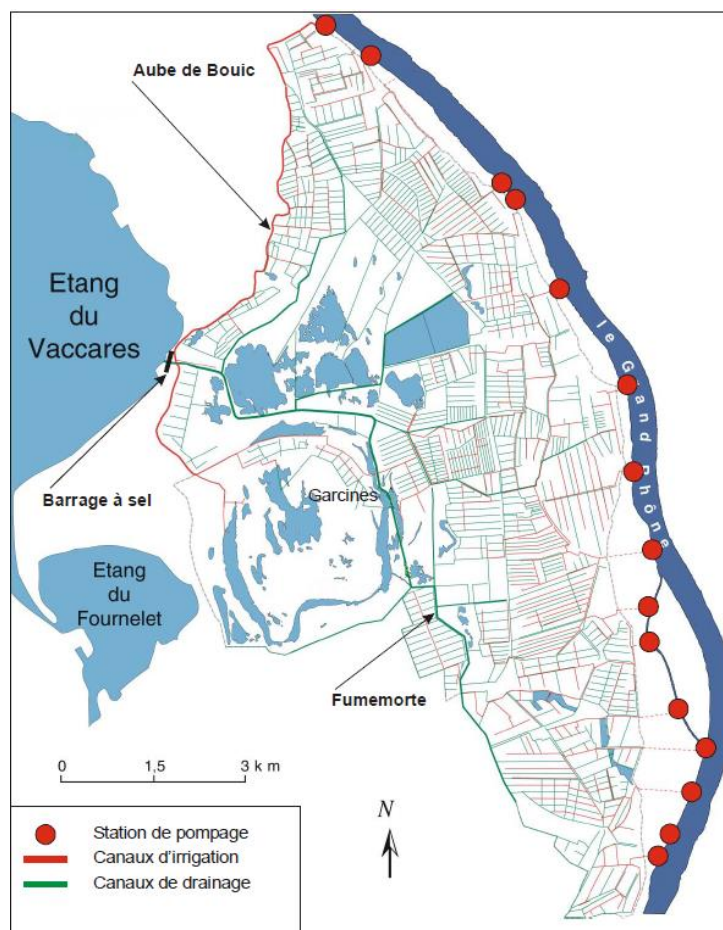


Figure A36 : Le bassin du Fumemorte et ses réseaux d'irrigation et de drainage (Poulet 2004).

Le bassin des Grandes Cabanes

Le domaine des Grandes Cabanes du Vaccarès Sud (Grandes Cabanes) est un espace naturel protégé situé dans le département des Bouches-du-Rhône sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer (13 460).

Ancienne chasse privée d'une superficie de 473 hectares, il a été acquis par le Conservatoire du littoral en mars 2012 qui en a confié la gestion à l'OFB. Le site est intégré dans un ensemble de zones humides de plusieurs milliers d'hectares au cœur de la Camargue, situé entre les bourrelets alluviaux du Petit Rhône et la dépression centrale du delta représentée par l'étang du Vaccarès, au centre d'importantes zones humides propriétés publiques (le Mas de la Cure, le Mas de Ménage, Consécanière et l'Etang de Vaccarès) et privées (les marais des Bruns, de Carrelet, des Frignants et de Bardouine).

Le domaine bénéficie d'inventaires et de mesures de protection multiples : ZNIEFF terrestre de type I et de type II, ZPS et ZSC Camargue, zone centrale de la Réserve de Biosphère de Camargue, zone Ramsar Camargue et dans le périmètre du Parc naturel régional de Camargue. Il a également obtenu le label européen « Territoires de faune sauvage » (Wildlife Estate) qui a pour ambition de promouvoir des gestions exemplaires conciliant la conservation de la nature et activités socio-économiques.

La richesse écologique du site s'exprime notamment par :

- Une remarquable mosaïque de milieux doux et saumâtres méditerranéens : Fourrés halphiles méditerranéens et thermo-atlantiques (*Sarcocornia fruticiosa*) (sansouïres), eaux oligo-

mésotrophes calcaires avec végétation benthique à *Chara spp* (baisses et marais), parcours substeppiques de graminées et annuelles du Thero-Brachypodieta (montilles), prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*), Galeries et fourrés riverains méridionaux (*Nerio-Tamaricetea* et *Securinegion tinctoriae*) et ripisylves.

- De vastes unités hydrauliques et une roselière centrale avec son cortège d'espèces patrimoniales : Panure à moustaches, locustelles, rousserolles, Bruant des roseaux, Héron pourpré, Butor étoilé, Blongios nain, etc.
- Une avifaune nicheuse à forte valeur patrimoniale : Canard chipeau et Nette rousse, larolimicoles coloniaux tels que les Mouettes mélanocéphales, Mouettes rieuses, Sternes hansels et pierregarins, Echasses blanches.
- Une importance régionale du site pour l'hivernage d'oiseaux d'eau : Canards chipeau, colvert, Souchet, Sarcelle d'hiver, Grande aigrette, etc.
- Une importance régionale pour la conservation du Grand rhinolophe (espèce de l'annexe II de la directive Habitat Faune Flore), le site étant dans le territoire de chasse de colonies proches.
- Une population de Cistudes d'Europe, espèce protégée listée à l'annexe II de la directive Habitat Faune Flore
- La présence d'herbiers de characées et de phanérogames aquatiques à forte valeur patrimoniale et/ou rares : *Zannichelia pedunculata*, *Riella notarisii*, *Cochlearia glastifolia*, *Elytrigia elongata*, etc.

Suite à une première notice de gestion provisoire, un premier plan de gestion a été élaboré en 2020 (Manceau, N. (coord) 2020a). C'est un plan de gestion multi-sites d'une durée de 10 ans, coordonné par le Conservatoire du littoral avec l'appui financier de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse concernant 5 espaces naturels protégés sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer :

- Les Grandes Cabanes du Vaccarès Sud (gestion OFB) 473 ha
- Le mas de la Cure (gestion Maison du cheval Camargue et mairie des SMM) 288 ha
- Le mas de Taxil (gestion Parc naturel régional de Camargue et mairie des SMM) 160 ha
- Vaccarès Grandes Cabanes (gestion SNPN – RNNC) 129 ha
- Vaccarès Romieu (gestion SNPN – RNNC) 60 ha

Ce plan de gestion a été élaboré en concertation avec le propriétaire, les gestionnaires, les acteurs du territoire et les bureaux d'études mandatés pour son élaboration. Il définit pour les 10 prochaines années les objectifs généraux de gestion à long terme en fonction des enjeux. Six objectifs à long terme ont été définis, déclinés en 27 objectifs opérationnels et 57 fiches actions :

1. Maintenir et restaurer la diversité et la qualité des milieux naturels
2. Favoriser une faune riche et diversifiée
3. Maintenir et promouvoir les activités traditionnelles
4. Préserver et valoriser le patrimoine paysager, culturel et architectural
5. Développer et partager la connaissance sur la gestion du patrimoine naturel
6. Mutualiser les outils et l'organisation au service d'un pilotage efficace

La méthode utilisée pour son élaboration s'appuie sur l'analyse de l'Espace de Bon Fonctionnement (EBF), elle repose sur l'identification des fonctions remplies par la zone humide, de ses menaces et pressions et des services-rendus afin d'établir une cartographie de l'EBF.

L'EBF des Grandes Cabanes comprenait à l'époque du plan de gestion tout le périmètre de l'ASA de la Sigoulette (Figure A37). Celui-ci sera à redéfinir depuis les travaux de reconnexion à l'étang du Vaccarès.

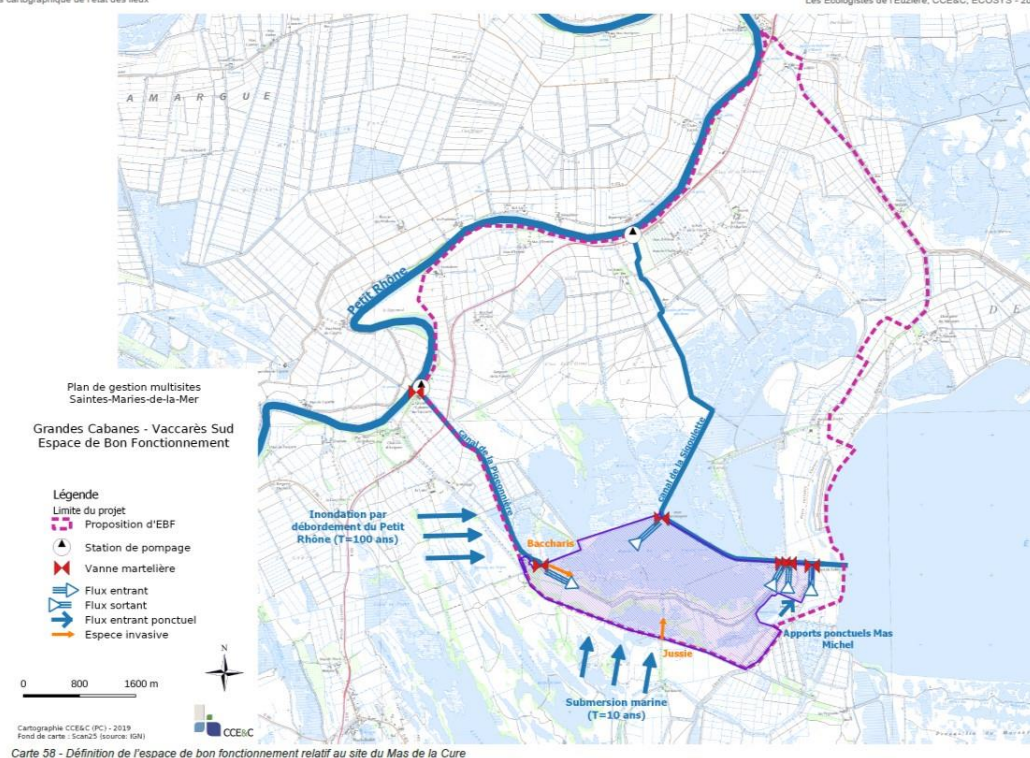


Figure A37 : L'Espace de Bon Fonctionnement des Grandes Cabanes (Manceau, N. (coord) 2020b).

Des inventaires piscicoles réalisés par le bureau d'étude Naturalia en septembre 2018 (MRE and Naturalia 2018) ont montré la présence significative de l'anguille européenne sur le site, en particulier dans les entités hydrauliques suivantes : canal de la Pigeonnière, marais Tortue et marais de Costières. Leurs tailles importantes ont posé l'hypothèse d'un système en vase clos duquel les anguilles ne pourraient sortir : les individus arrivent depuis le Petit Rhône mais ne peuvent ensuite migrer vers l'étang du Vaccarès en raison de la présence d'ouvrages hydrauliques non propices à la migration piscicole (stations de pompage et clapet anti-retour empêchant les flux vers le Vaccarès).

Une action du plan de gestion est ciblée sur cet enjeu :

Objectif à long terme 2 :	Favoriser une faune riche et diversifiée
Objectif opérationnel :	Rétablir la continuité piscicole vers l'étang du Vaccarès
Code Action :	2.7.A
Libellé de l'action :	Rétablir la continuité piscicole
Site concerné :	Grandes Cabanes du Vaccarès Sud
Priorité :	Très forte

Afin d'étudier la faisabilité d'une reconnexion gravitaire avec l'étang du Vaccarès, une étude technique préalable a été réalisée en 2022 (CCE&C). Le modèle hydraulique répondant favorablement, les travaux ont pu être finalisés en juillet 2023. Ils ont consisté en des redimensionnements et créations d'ouvrages et de canaux sur 300m de linéaire dont le doublement du dernier ouvrage au Vaccarès passant sous un chemin communal (Figure A38 et A39).

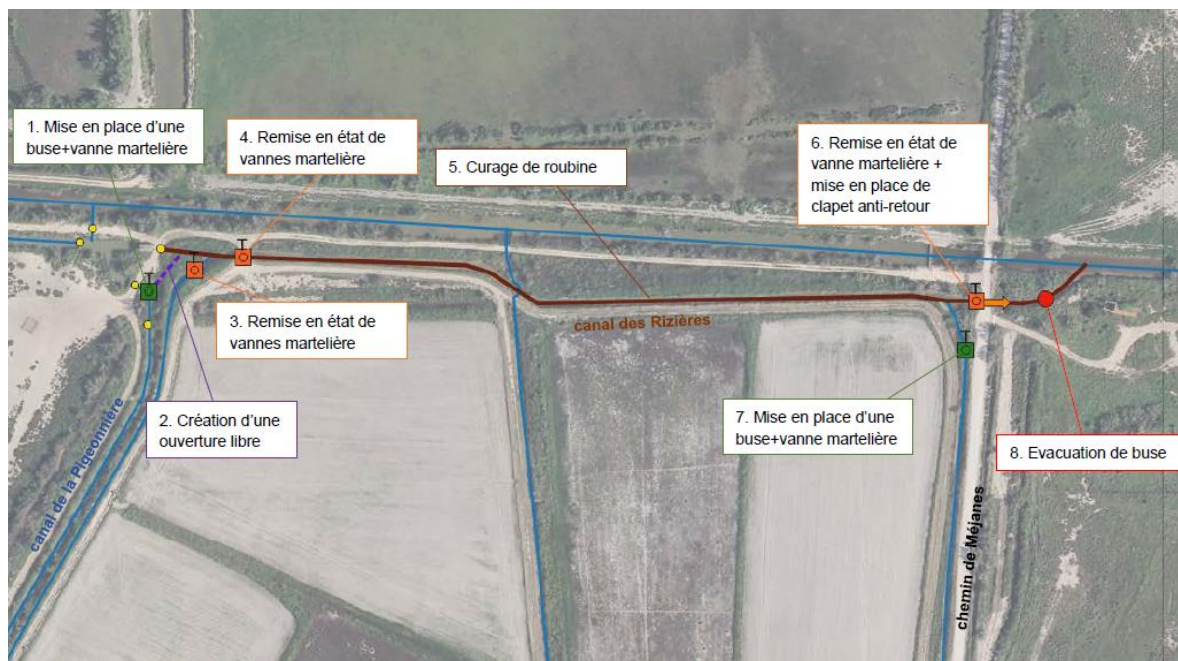


Figure A38 : (En haut) carte prévisionnelle des travaux (CCE&C 2023) et (en bas) photographies illustrant les travaux de restauration de la connexion entre le bassin des grandes cabanes et l'étang du Vaccarès ©C. Tetrel

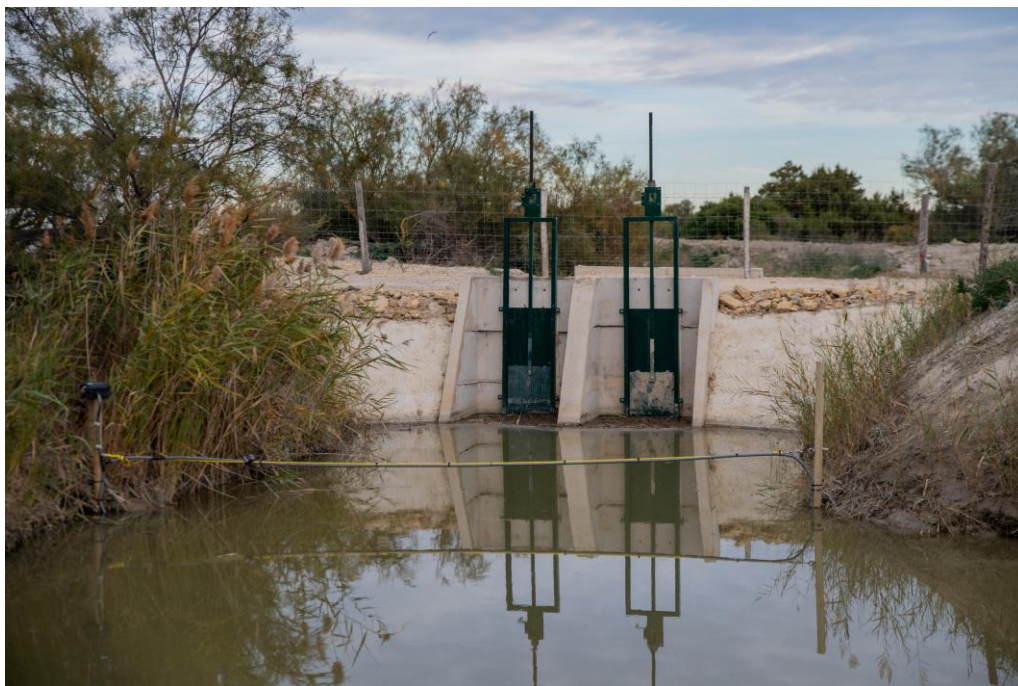


Figure A39 : Photographie du nouvel ouvrage de reconnexion entre le bassin des grandes cabanes et l'étang du Vaccarès. Au premier plan se visualise l'antenne aval de la station d'écoute RFID dénommée « GC- Aval » ©T. Tzélépoglou

Annexe 2 - Cycle de vie de l'anguille européenne

L'anguille européenne, espèce facultativement catadrome, se reproduit dans la mer des Sargasses, à environ 6 000 km des côtes européennes. Les œufs éclosent en des larves dites leptocéphales qui vont parcourir cette distance en 200 à 500 jours, en profitant des courants océaniques tels que le *Gulf stream*. A proximité du plateau continental, ces larves se métamorphosent en civelles, le premier stade juvénile de l'anguille, complètement transparent. Les civelles partent à la conquête des milieux aquatiques continentaux, depuis le trait de côte marin aux habitats d'eau douce, où elles commencent à se nourrir et à se pigmenter. Elles sont en grande majorité attirées par les panaches fluviaux et cherchent pour la plupart à coloniser les estuaires ou les lagunes. Elles peuvent également remonter les cours d'eau, et, en l'absence d'obstacles, être observées à plus de 1000 m d'altitude.

Les civelles grandissent et deviennent anguillettes, puis anguilles jaunes ou vertes. Cette phase de croissance va durer plusieurs années, de 2 à 15 ans pour les mâles et de 3 à 20 ans pour les femelles (Durif et al. 2020, Hoste 2024).

Avant de repartir en mer, les anguilles subissent, à nouveau, des transformations morphologiques et physiologiques pour atteindre le stade argenté (Aroua et al. 2006, van Ginneken et al. 2007, Durif et al. 2009). Ces modifications physiologiques (augmentation de la taille des yeux et des nageoires pectorales, apparition d'une ligne latérale sensorielle, épaississement de la peau, changement de couleur, etc.) la préparent au voyage retour. Le plus souvent, c'est au moment des crues automnales que les anguilles argentées repartent en mer : c'est la **dévalaison**, appelée aussi **échappement**.

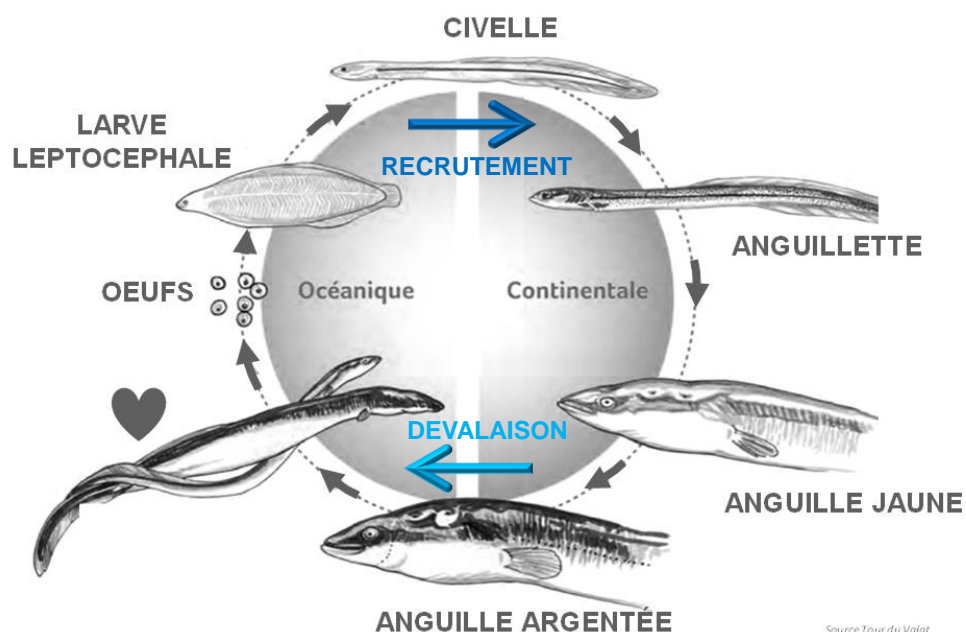


Figure A40 : Cycle de vie de l'anguille européenne

Annexe 3 - Fonctionnement des ouvrages

Le fonctionnement des principaux ouvrages considérés dans cette étude sont ici présentés.

Bassin des Grandes Cabanes

Au sein du domaine des Grandes Cabanes, il existe de nombreux ouvrages de connexion qui permettent de gérer la circulation des eaux entre les différentes unités hydrauliques (Figure A41 et Figure A42).

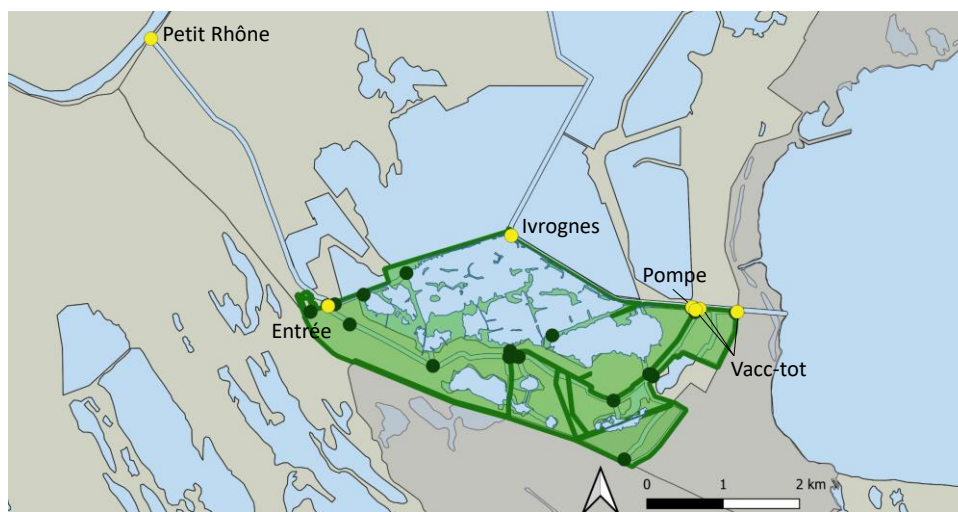


Figure A41 : Localisation des différents ouvrages de connexion permettant de gérer la circulation des eaux du domaine des Grandes Cabanes. Les ouvrages en jaune sont ceux considérés dans cette étude.

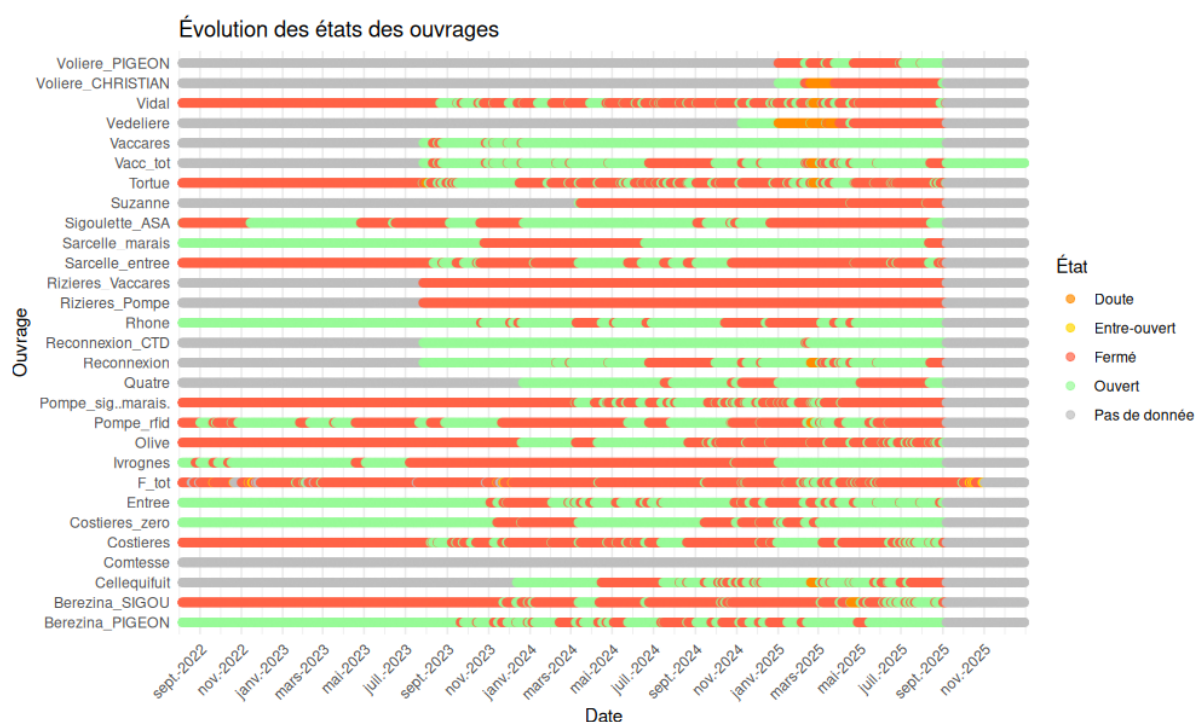


Figure A42 : Manipulations des ouvrages du bassin des Grandes Cabanes de septembre 2022 à novembre 2025. Source des données : OFB.

Parmi ces ouvrages, dans cette étude, nous nous intéressons surtout au fonctionnement de 6 ouvrages :

- L'ouvrage de la prise gravitaire au Petit Rhône. Ce dernier est laissé en majorité ouvert, sauf en cas de crues (pour des raisons de sécurité civile) ou en raison de niveaux d'eau trop élevés dans les marais, le système des Grandes Cabanes étant difficilement à drainer.
- L'ouvrage dénommé « Entrée » qui se situe sur le canal de la Pigeonnière, qui permet de contrôler l'afflux des eaux à l'entrée du domaine des Grandes Cabanes.
- Les martelières dénommées « Ivrognes » et « Pompe » qui contrôlent les deux connexions des Grandes Cabanes avec le canal de l'ASA de la Sigoulette. Ces deux sorties ont été utilisées pour drainer les Grandes Cabanes jusqu'aux travaux de reconnexion. La connexion Ivrognes est équipée d'un clapet anti-retour. Si les niveaux sont trop hauts dans les Grandes Cabanes et dans l'étang du Vaccarès, ces ouvrages peuvent encore être ouverts pour améliorer le drainage du système.
- Les 3 ouvrages à l'aval des Grandes Cabanes qui contrôlent la reconnexion avec l'étang du Vaccarès (Figure A43). Si un de ses 3 ouvrages est fermé, la voie d'échappement entre le site des Grandes Cabanes et l'étang du Vaccarès est bloquée. Un indice (nommé « Vacc_tot ») a été créé afin de combiner les informations de manipulation de ces 3 ouvrages afin de résumer l'information.

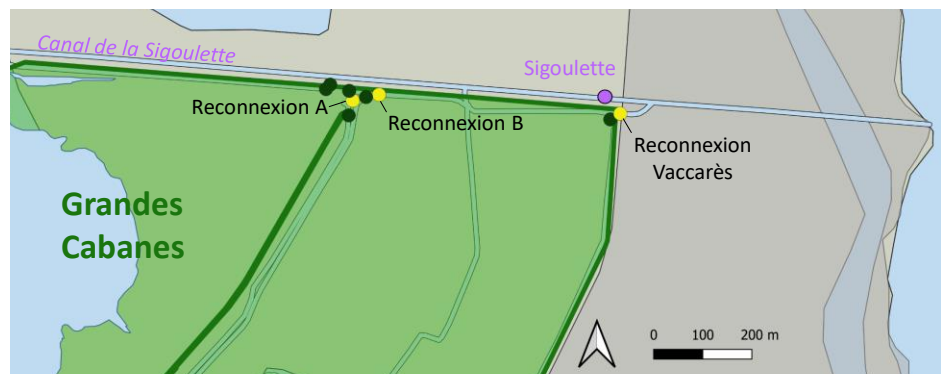


Figure A43 : Localisation des 3 ouvrages de connexion relatif à la reconnexion des Grandes Cabanes à l'étang du Vaccarès (en jaune).

Ouvrage de l'ASA de la Sigoulette

Le canal de drainage de l'ASA de la Sigoulette a un exutoire dans l'étang du Vaccarès qui est barré par un ouvrage (Figure A43, Figure A44). Cet ouvrage est en temps normal tout le temps fermé. Avec la mise en œuvre du plan de sauvegarde du Vaccarès, cet ouvrage a été néanmoins ouvert à plusieurs reprises pour apporter exceptionnellement de l'eau douce à l'hydrosystème du Vaccarès, dès l'automne 2022.



Figure A44 : Photographie de l'ouvrage de la Sigoulette. ©D. Nicolas

Pertuis de la Fourcade

L'hydrosystème du Vaccarès est directement connecté à la mer par le pertuis de la Fourcade, et, indirectement, par le pertuis de la Comtesse *via* le site des Etangs et marais des salins de Camargue (EMSC). Ces deux ouvrages appartiennent au syndicat mixte interrégional d'aménagement des digues du delta du Rhône et de la mer (SYMADREM).

Le pertuis de la Fourcade est composé de 13 vannes coulissantes à ouverture manuelle (Figure A45), et est localisé sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer dans la partie sud-ouest du delta. Jusqu'en 2025, ces vannes sont gérées par la Commission Exécutive De l'Eau (CEDE), un groupe d'acteurs qui se réunit régulièrement pour prendre des décisions collégiales sous la responsabilité de la DDTM. Les décisions de la CEDE visent en priorité à empêcher l'hydrosystème lagunaire d'être inondé ou de devenir hypersalin, de le protéger contre les tempêtes marines et de favoriser la circulation des poissons (dont le recrutement des civelles).

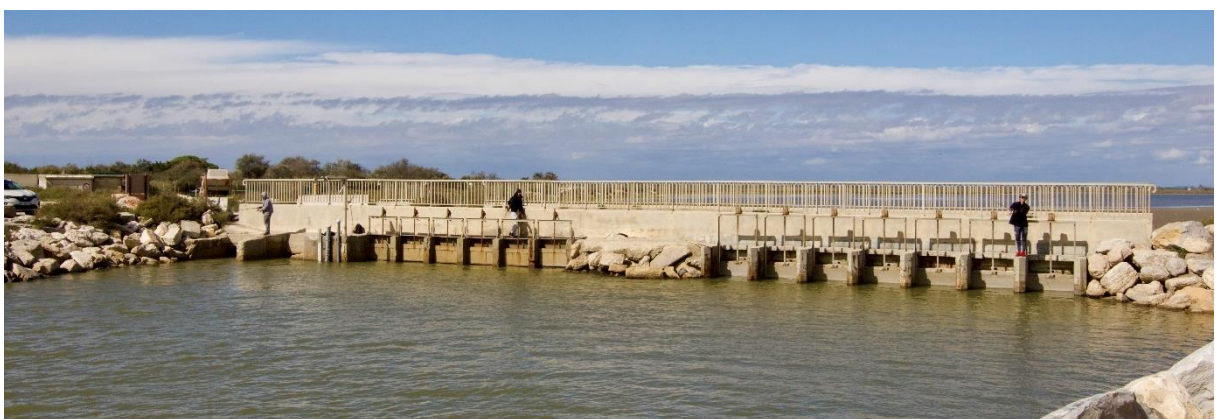


Figure A45 : Photographie du pertuis de la Fourcade vue depuis le front de mer. ©C. Bouchard

L'étang du Vaccarès constitue une dépression située légèrement en dessous du niveau de la mer, et, de ce fait, nécessite une gestion précise des niveaux des eaux pour éviter les inondations, qui pourraient affecter les habitations des riverains. En cas de tempêtes venant du sud, les vannes sont fermées pour limiter les entrées d'eau salée, qui engendrerait un stockage de sel supplémentaire dans le système. Actuellement, c'est essentiellement par temps de mistral (vent de secteur N/N-O),

lorsque les niveaux d'eau du côté des étangs sont supérieurs au niveau de la mer, que les vannes sont ouvertes pour permettre au système de se vidanger. Ces ouvertures entraînent souvent des courants forts qui ne sont pas propices à la migration active, à contre-courant, de la plupart des poissons provenant de la mer et souhaitant coloniser le système. Quand le niveau d'eau du côté des étangs est supérieur au niveau de la mer, au moins deux vannes restent ouvertes pour favoriser les échanges hydro-biologiques (Rosecchi et al. 1998, Dervieux et al. 2006). Néanmoins, dans le but d'assurer le recrutement des civelles, davantage d'ouvertures sont réalisées lorsque l'association Migrateurs Rhône-Méditerranée (MRM), qui gère la passe à civelles localisée en parallèle de cet ouvrage, observe de forts pics de migration. A titre indicatif, entre 2010 et 2020, toutes les vannes sont restées fermées en moyenne 40 % de l'année, au moins deux vannes ont été ouvertes pendant environ 28 % de l'année et au moins trois pendant 32 % de l'année (Boutron et al. 2021). Entre 2021 et 2025, le pertuis de la Fourcade est resté encore davantage fermé, notamment afin d'éviter l'hypersalinisation de l'hydrosystème du Vaccarès (Figure A46).

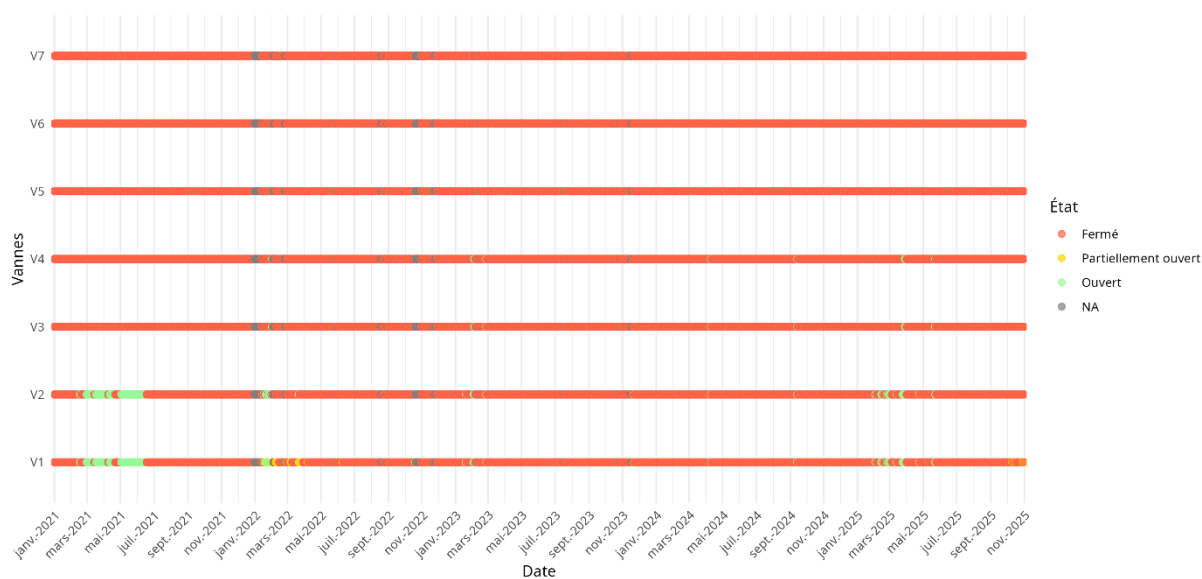


Figure A46 : Manipulations des sept vannes du pertuis de la Fourcade de janvier 2021 à novembre 2025. Source des données : mairie des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Les informations relatives aux 7 vannes manipulées du pertuis de la Fourcade ont été résumé en un seul indice (« F_tot », Figure A48). Cet indice indique une ouverture si au moins une des 7 vannes est ouverte.

Pertuis de la Comtesse

Le Pertuis de la Comtesse (Figure A47) est géré par la Société Nationale de Protection de la Nature (SNPN) qui gère également la Réserve naturelle nationale de Camargue (RNNC). Cet ouvrage est géré de manière à privilégier la connectivité hydrobiologique entre l'hydrosystème du Vaccarès et les EMSC, tout en cherchant à limiter la sursalinisation de la RNC. Les données relatives à la manipulation de cet ouvrage pour la durée du projet COLAGANG n'ont pas pu être récupérées.



Figure A47 : Photographies du pertuis de la Comtesse en deux parties. © D. Nicolas

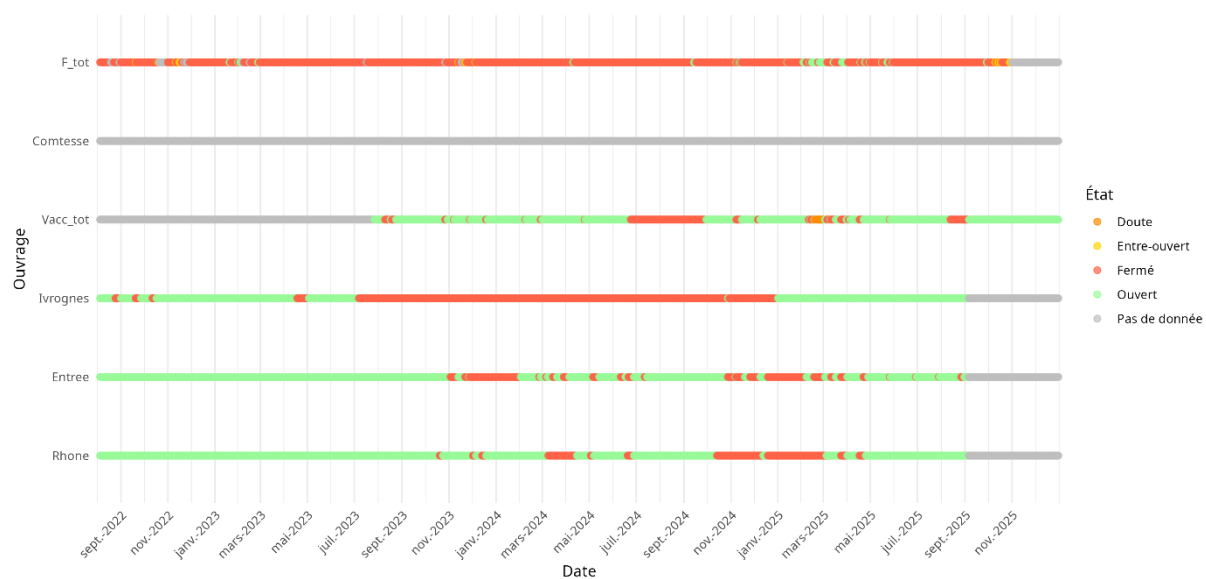


Figure A48 : Résumé des informations relatives à la manipulation des ouvrages clés dans le cadre du projet COLAGANG. F_tot = 7 vannes du pertuis de la Fourcade ; Vacc_tot = 3 ouvrages de la reconnexion des grandes Cabanes avec l'étang du Vaccarès ; Rhone = ouvrage de connexion entre le canal de la Pigeonnière (qui alimente le domaine des Grandes Cabanes) et le Petit Rhône.

Annexe 4 – Exploration des données météorologiques

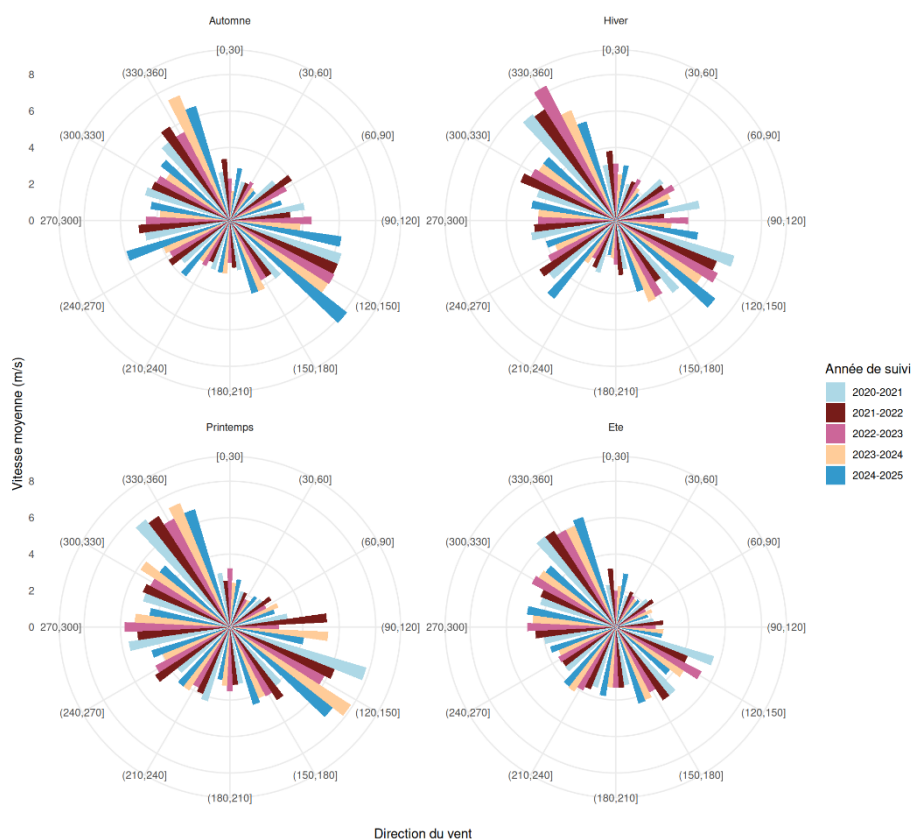


Figure A49 : Vitesse moyenne du vent en fonction de la direction par année de suivi. Source des données : Météo France, station de la Tour du Valat.

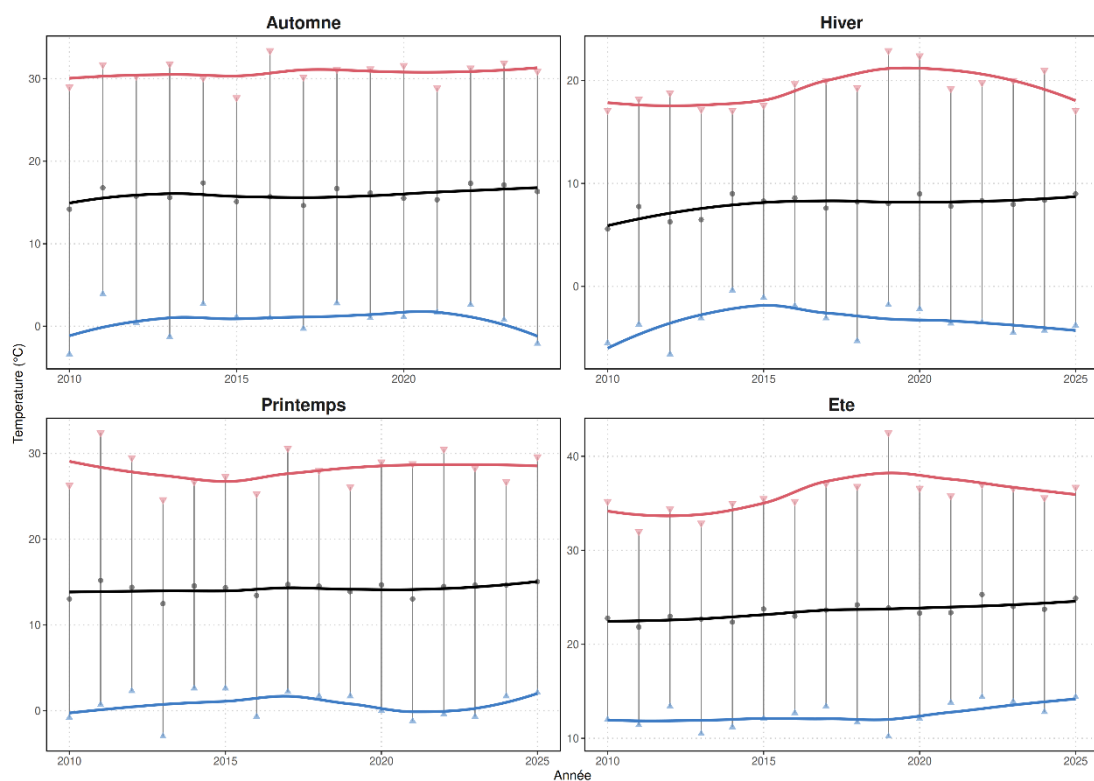


Figure A50 : Evolution annuelle de la température de l'air depuis janvier 2010 à juin 2025 (triangle bleu = minimum, point gris = moyenne, triangle rouge = maximum) par saison (automne = septembre à novembre, hiver = décembre à février, printemps = mars à mai, été = juin à août). Source des données : Météo France, station Tour du Valat.

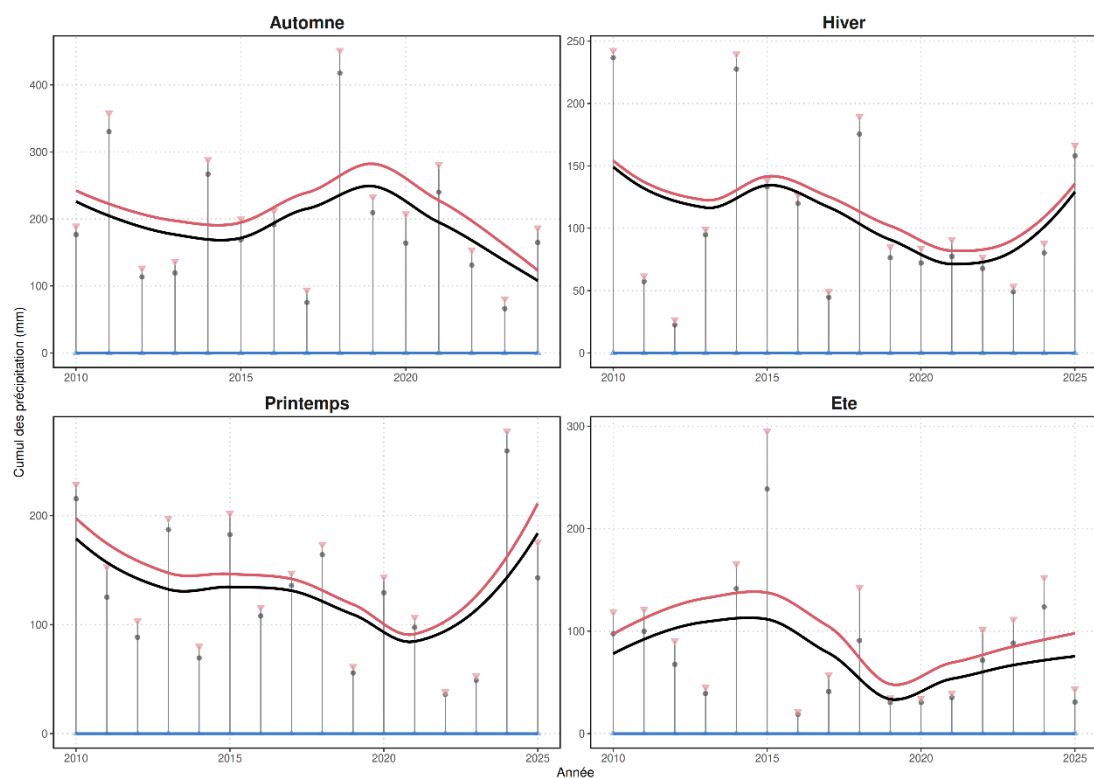


Figure A51 : Evolution annuelle du cumul des précipitations depuis janvier 2010 à juin 2025 (point gris = somme des précipitations, triangle rouge = somme des précipitations + maximum journalier de la saison) par saison (automne = septembre à novembre, hiver = décembre à février, printemps = mars à mai, été = juin à août). Source des données : Météo France, station Tour du Valat.

Annexe 5 – Effort de pêche scientifique pour le suivi en capture-marquage-recapture de l'anguille

La capture d'anguilles est réalisée à travers des campagnes de pêche scientifique qui bénéficient d'autorisations de la préfecture (DDTM). Les campagnes de pêche dédiées à la capture et au marquage des anguilles sont réalisées entre octobre et avril, lorsque les températures de l'eau sont inférieures à 16°C pour limiter les risques d'infection, à l'aide d'engins de pêche passif mais aussi, aux Grandes Cabanes, de la pêche électrique.

Suivi à l'aide d'un système passif : la pêche aux filets

Les engins de pêche passifs sont positionnés le lundi et relevés toutes les 24h jusqu'au vendredi. Dans les canaux, ce sont des verveux qui sont placés de manière à barrer transversalement leur section (Figure A52 et Figure A53). A chaque site de pose, un verveux ou deux verveux sont positionnés selon la largeur du canal. Lorsque deux verveux sont utilisés, ils sont placés soit côte-à-côte soit queue-à-queue (Figure A52), de manière à capturer la macrofaune aquatique qui se déplace depuis l'amont et depuis l'aval. Dans les marais, qui sont des milieux ouverts, ce sont des capêchades qui sont utilisées : une paradière est placée perpendiculairement à la berge depuis le bord et l'autre extrémité est fermée par un cœur de 3 verveux (Figure A52 et Figure A53).

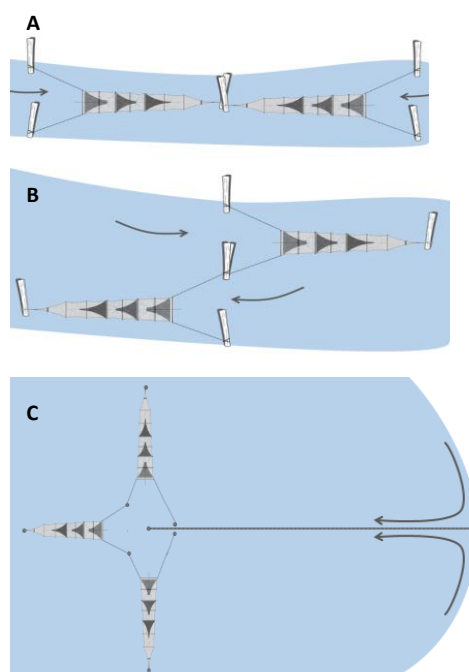


Figure A52 : Illustration des différentes configurations de pose de filets utilisées pour la capture des anguilles : dans les canaux, A/ deux verveux positionnés en queue-à-queue, ou B/ deux verveux positionnés côte-à-côte en tête à queue ; dans les milieux ouverts : C/ capêchade, une paradière et un cœur formé par trois verveux. Les flèches indiquent le sens de déplacement des poissons qui se font capturer.



Figure A53 : En haut, verveux positionnés côte-à-côte, en tête à queue dans le canal du Fumemorte (© D. Nicolas). En bas, mise en place d'une capétschade aux Grandes Cabanes (© J.-C. Brandes)

Canal du Fumemorte

Depuis 1993, la population d'anguille européenne du canal principal du bassin du Fumemorte est suivie pendant une semaine tous les mois à la station 1 (Figure 9), à l'aide de deux verveux posés côte-à-côte en tête à queue, de manière à barrer la section du canal (Figure A52). Une station supplémentaire a été ajoutée en 2013 plus à l'aval (station 2, Figure 9). Pendant la semaine de pêche, les filets sont relevés toutes les 24h, du mardi au vendredi, soit 4 jours de pêche consécutifs. L'effort de pêche associé à ce suivi long terme est relativement constant dans le temps (Figure A54). Les quelques variations observées sont essentiellement liées à la présence de jours fériés lors des semaines de pêche, à des conditions environnementales extrêmes (par exemple gel, niveaux d'eau insuffisants) ou à de rares soucis de personnel. La non validité des relèves de filets est quasiment nulle.



Figure A54 : Effort de pêche correspondant aux deux stations suivies sur le long terme depuis 1993 pour la station 1 et depuis 2013 pour la station 2.

Depuis 2001, la population d'anguille du Fumemorte est suivie en capture-marquage-recapture : tous les individus capturés de plus de 180 mm sont marqués avec un transpondeur de 12 mm en sous-cutané. Certains individus sont recapturés jusqu'à plus de 9 années après leur premier marquage. Ces recaptures permettent de suivre la croissance des individus, leur condition et l'évolution de leur stade de développement.

Entre 2009 et 2018, l'effort de pêche a été considérablement intensifié du fait de la mise en place d'un plan de régulation expérimental du silure glane. Ce fut l'opportunité de déployer un effort supplémentaire pour tenter de capturer et recapturer des anguilles.

Par ailleurs, un verveux est posé le plus souvent possible d'octobre à avril, depuis 2001, en travers du canal à proximité de son embouchure (barrage à sel, Figure 9), de manière à capturer les anguilles qui chercheraient à s'échapper du bassin. Ce filet n'étant pas posé en permanence, toutes les anguilles argentées (marquées ou non) ne sont pas capturées lors de leur échappement. Ce filet est positionné à l'aval de la station d'écoute RFID aval du Fumemorte. La capture d'individus marqués dans le filet permet de vérifier s'ils ont bien été détectés par les antennes RFID (Annexe 12).

Bassin des Grandes Cabanes

Aux Grandes Cabanes, les stations « Entrée » et « Pompe » sont localisées dans le canal de la Pigeonnière, canal qui alimente le site des Grandes Cabanes en eau du Petit Rhône. Ces deux stations sont équipées chacune de deux verveux placés queue-à-queue (Figure A52). Les sites « Tortue » et « Grand marais » correspondent à des marais ouverts et sont équipés d'une capêchade. Toutefois, le site du Grand Marais n'a été échantillonné qu'au printemps 2022 : le site étant difficile d'accès et les captures d'anguilles y étant très faibles, ce site a été abandonné. De plus, ce site est une remise importante à l'automne et durant l'hiver pour l'avifaune, aucune pêche ne peut alors être pratiquée pour éviter le dérangement. Les sites de « Tortue canal » et « Berezina Tortue » sont échantillonnés à l'aide d'un seul verveux qui vise à capturer les anguilles qui chercheraient à sortir du marais de Tortue. Les sites « Bérézina Sigoulette » et « Pompe Sigoulette » correspondent à des bras étroits du grand marais et ont été équipés seulement d'un verveux ouvert vers le marais, tout comme le site « Costières » du marais de Costières. La plupart des relèves de filets ont été validées (96.5%, Figure A57). Les quelques relèves non validées correspondent à des filets troués ou torsadés.

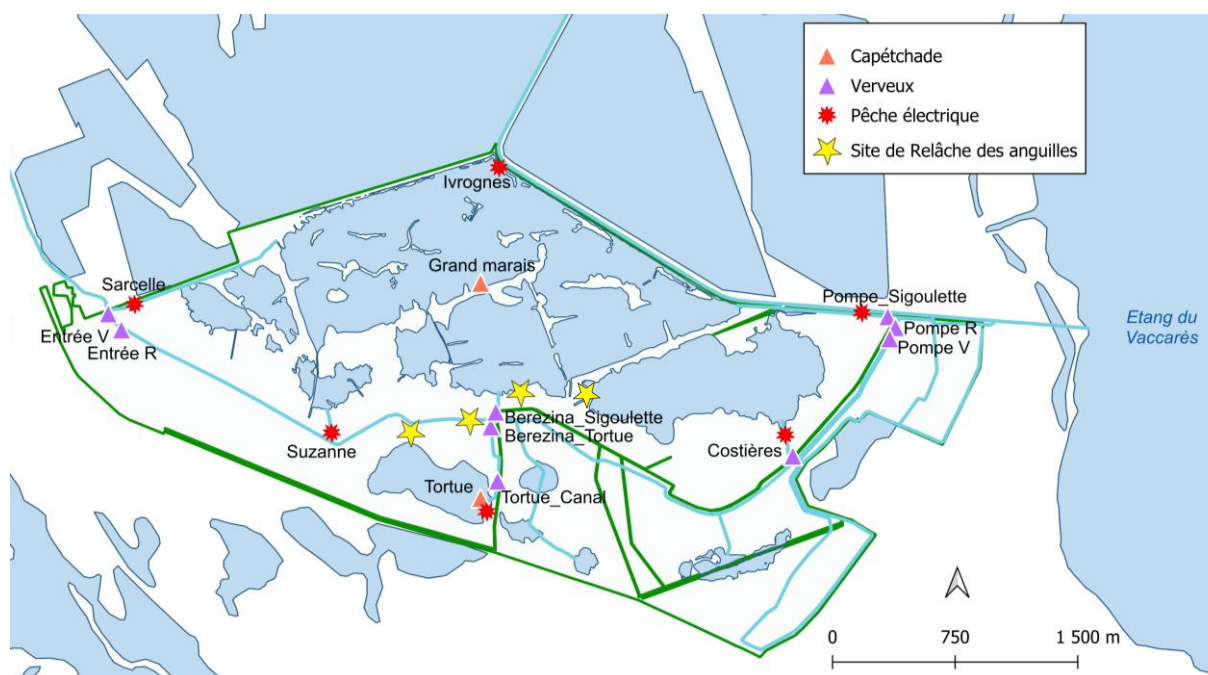


Figure A55 : Localisation des sites de capture en fonction de la méthode utilisée (verveux, capêchade ou pêche électrique) et localisation des sites de relâche des anguilles selon le protocole mis en place en début de projet, en 2021.



Figure A56 : Photographies de relèves de filets et de pêche électrique aux Grandes Cabanes (OFB/TDV)

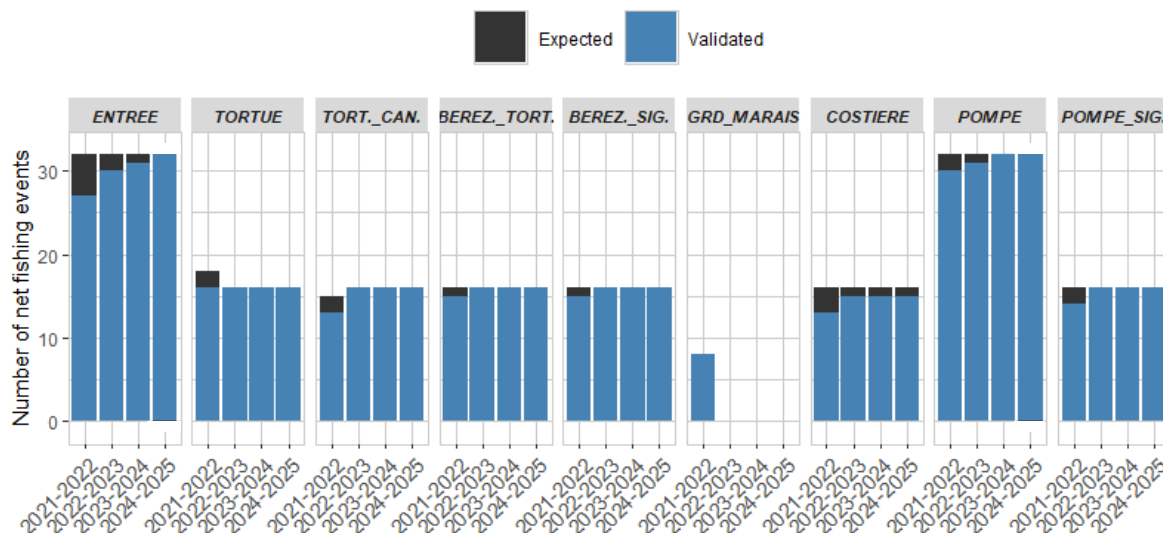


Figure A57 : Nombre de relèves de filet par station et année du suivi effectives par rapport au nombre prévu réalisées aux Grandes Cabanes. Les efforts de pêche à Entrée et Pompe sont doublés car deux filets sont positionnés à ces stations.

Suivi par pêche électrique

Uniquement aux Grandes Cabanes, lors de la journée de pose des filets (le lundi), plusieurs sites sont échantillonnés en pêche électrique par des agents habilités de l'OFB du service régional connaissance Sud-PACA et du service départemental des Bouches-du-Rhône (Figure A56 et Figure A58). La première pêche électrique a eu lieu lors de la campagne de novembre 2021. Cette première journée, le système Martin-pêcheur a été testé et s'est avéré peu efficace en raison de la conductivité du milieu (0.9 à 1.2mS). A partir de mars 2022, la pêche électrique a été réalisée avec le système Héron aux stations « Sarcelle », « Suzanne », « Costière » et « Pompe Sigoulette », et s'est avéré plus efficace. Les stations de pêche électrique Tortue et Ivrognes ont été abandonnées. En avril 2024 et en octobre 2025, la pêche électrique n'a pas eu lieu en raison de l'indisponibilité de l'équipe OFB habilitée.

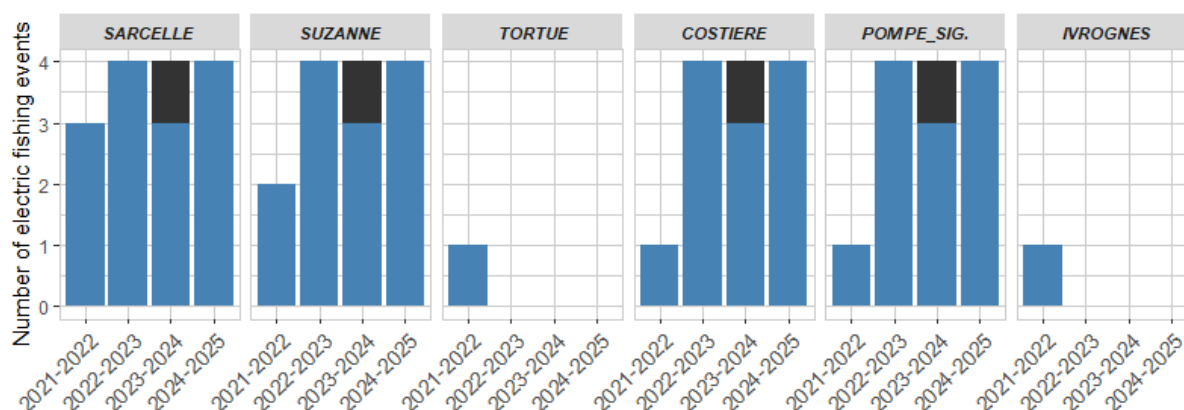


Figure A58 : Nombre de pêches électriques réalisées par station et année de suivi

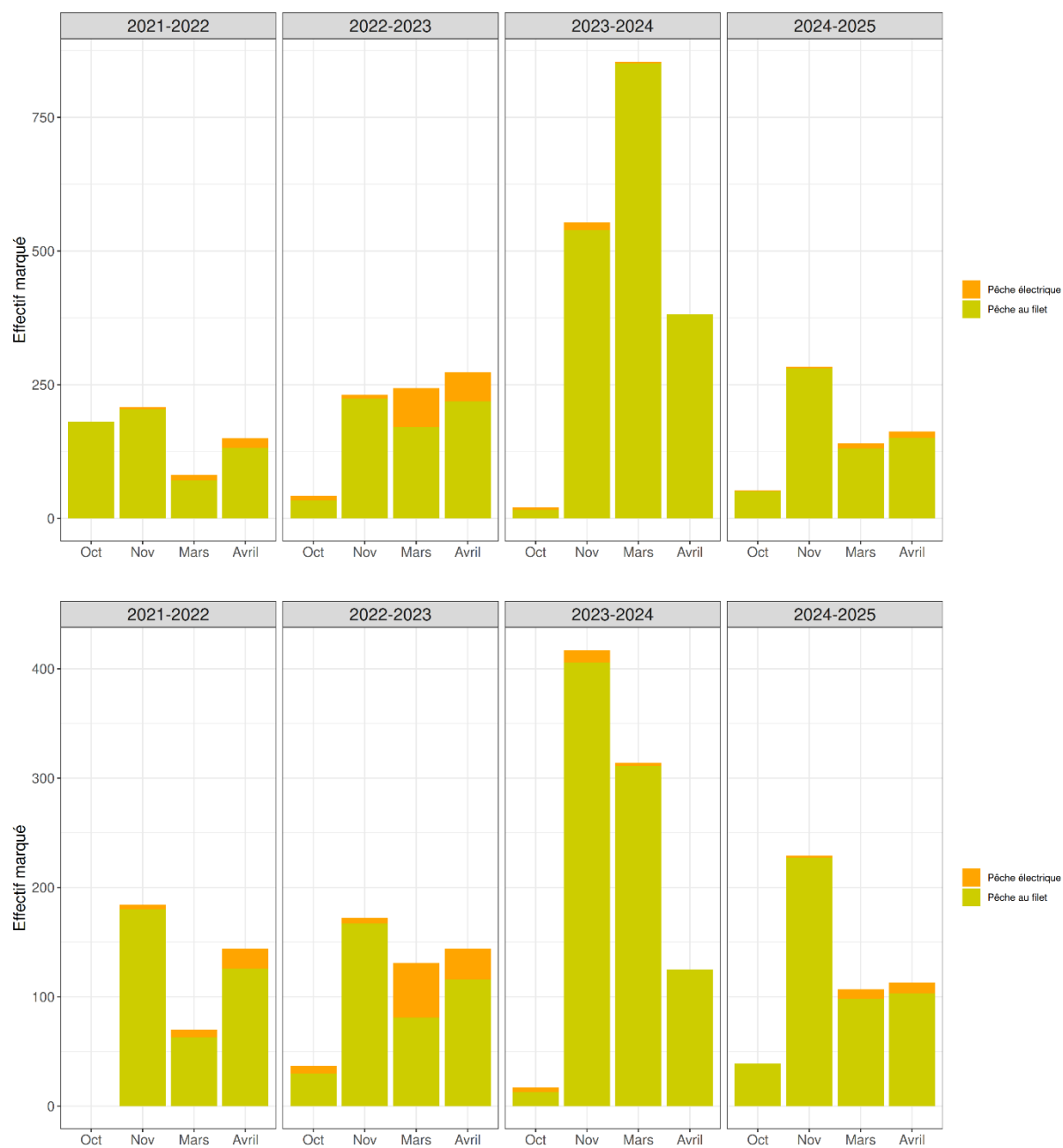


Figure A59 : Nombre d'individus marqués en fonction de la méthode de capture par année du suivi aux Grandes Cabanes (en haut) toutes marques confondues (12 et 23 mm) et (en bas) en considérant uniquement les marques de 23 mm de long.

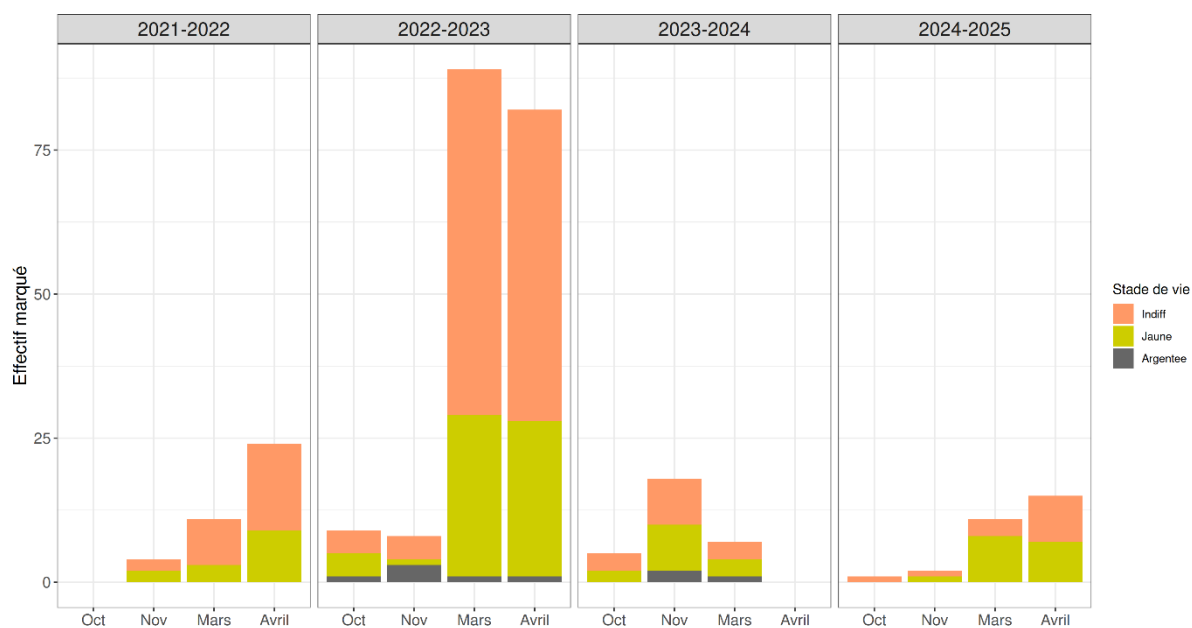


Figure A60 : Nombre d'individus capturés par pêche électrique et marqués en fonction du stade de développement par année du suivi aux Grandes Cabanes

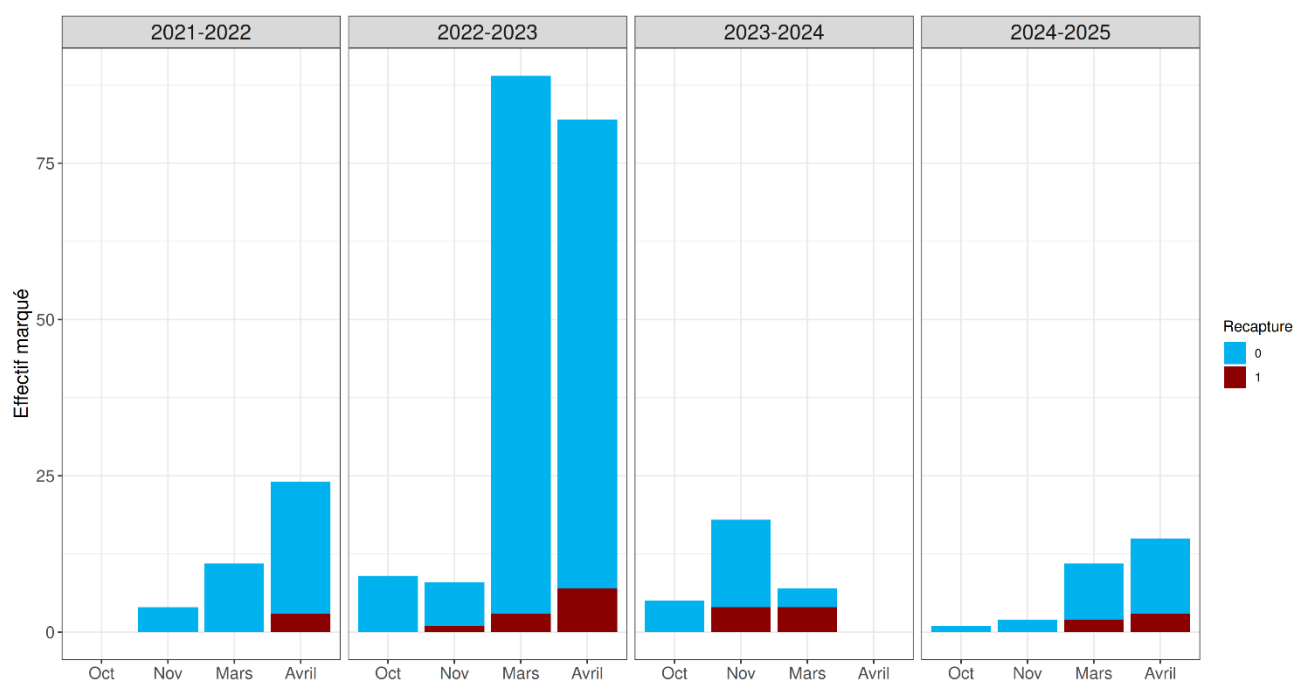


Figure A61 : Nombre d'individus capturés par pêche électrique et marqués en fonction de s'il s'agit d'une recapture ou non.

Annexe 6 - Inventaire des espèces piscicoles

Depuis janvier 2021 et jusqu'en avril 2025, un total de 24 taxons de poissons actinoptérygiens ont été répertoriés dans le bassin des Grandes Cabanes (Tableau A3) et de 25 dans le canal du Fumemorte (au travers du suivi long-terme, Tableau A4). Pour éviter les erreurs d'identification, les mugilidés et les brèmes capturés sont présentés qu'au niveau de la famille.

Le peuplement piscicole est dominé par les espèces d'eau douce dans le bassin des Grandes Cabanes (19 taxons – soit 79% des taxons recensés), ainsi que dans le canal du Fumemorte (16 taxons – soit 64%, Figure A62 et Figure A63). Aux deux stations d'échantillonnage 1 et 2 du canal du Fumemorte, les espèces de poissons lagunaires (notamment athérines, mais aussi gobies du genre *Pomatoschistus*, syngnathe, épinoche) et marines migratrices (mugilidés) sont davantage inventoriées au printemps (mars-avril), au début de la période d'irrigation. Ces présences résultent de la connexion du canal avec l'étang du Vaccarès où les eaux sont surtout euhalines depuis 2021. Dans ce canal, neuf espèces de crustacés ont également été capturées, dont 6 de crevettes, 2 de crabes et l'écrevisse de Louisiane. Le crabe vert méditerranéen, *Carcinus maenas*, n'a pas été capturé dans les Grandes Cabanes, par contre l'écrevisse américaine, *Orconectes limosus*, qui n'est plus détecté dans le canal du Fumemorte depuis le début des années 2000, y a été régulièrement détectée, notamment sur la station de Berezina Sigoulette.

L'anguille, espèce catadrome, a toujours été capturée aux stations d'échantillonnage des Grandes Cabanes, mais pas systématiquement à la station 1 du canal du Fumemorte. L'aloise feinte méditerranéenne (*Alosa agone*), espèce anadrome, a été ponctuellement détectée dans les deux bassins, uniquement à l'automne (octobre-novembre, Figure A62).

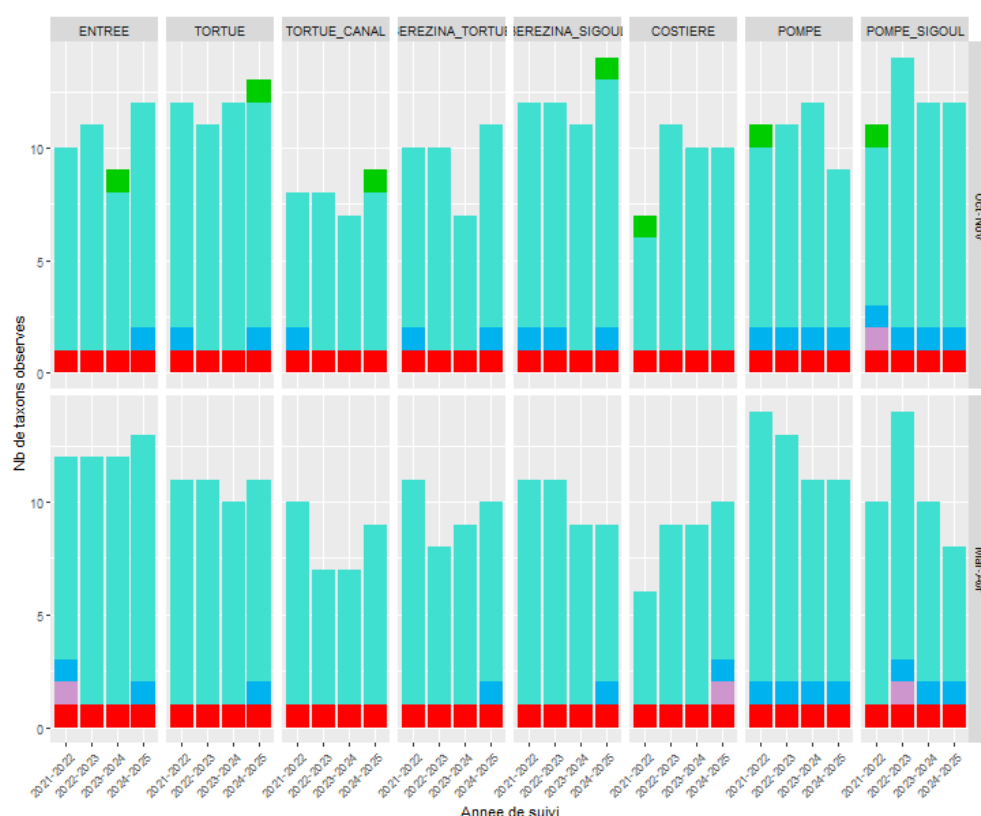


Figure A62 : Nombre de taxons piscicoles observés par campagne de pêche par site échantillonné et par saison et année de suivi dans le domaine des Grandes Cabanes. Les espèces sont catégorisées en fonction de leur utilisation des habitats : AN = Anadrome ; ED = Eau douce ; MM = Marine Migratrice ; LG = Lagunaire ; CA= Catadrome

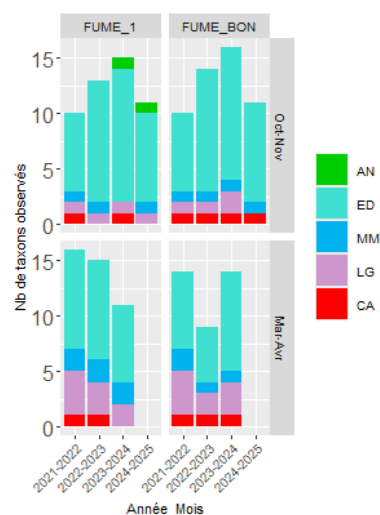


Figure A63 : Nombre de taxons piscicoles observés par campagne de pêche aux stations de suivi long-terme (Fume 1 et Fume Bon) et par saison et année de suivi depuis octobre 2021 dans le canal du Fumemorte. Les espèces sont catégorisées en fonction de leur utilisation des habitats : MM = Marine Migratrice ; LG = Lagunaire ; ED = Eau douce ; CA= Catadrome ; NA = Alevins non identifiés. Les données de mars et avril 2025 n'ont pas encore été traitées.

Tableau A3 : Liste des espèces inventoriées par station d'échantillonnage dans le bassin des Grandes Cabanes d'octobre 2021 à avril 2024. Pour le groupe écologique : ED = espèce d'eau douce ; LG = lagunaire ; MM = marine migratrice ; MO = marine occasionnelle ; CA = catadrome ; LGM = espèce lagunaire et marine. Case grisée = présence ; case blanche = non détecté.

Subphilum	Classe	Groupe taxonomique	Nom français	Nom scientifique	Groupe écologique	BEREZINA_SIGOUL	BEREZINA_TORTUE	COSTIERE	ENTREE	POMPE	POMPE_SIGOUL	SARCELLE	SUZANNE
Crustacea	Malacostraca	CARIDINE	Caridine	<i>Atyaephyra desmaresti</i>	ED								
		CRABE DE VASE AMERICAIN	Crabe de vase américain	<i>Rhithropanopeus harrisii</i>	LG								
		CREVETTE_GRISE_tot	Crevette grise	<i>Crangon crangon</i>	EM								
		ECREVISSE AMERICAINE	Ecrevisse américaine	<i>Orconectes limosus</i>	NA								
		ECREVISSE DE LOUISIANE	Ecrevisse de Louisiane	<i>Procambarus clarkii</i>	ED								
		GAMMARE	Gammare	Gammaridae	LG								
		Palaemonidae_tot	Palaemonidae	Palaemonidae	NA								
Vertebrata	Actinopterygii	ABLETTE	Ablette	<i>Alburnus alburnus</i>	ED								
		ALOSE FEINTE	Alose feinte méditerranéenne	<i>Alosa agone</i>	AN								
		ANGUILLE	Anguille européenne	<i>Anguilla anguilla</i>	CA								
		ATHERINIDAE_tot	Joël	<i>Atherina boyeri</i>	LG								
		BLENNIE FLUVIATILE	Blennie fluviatile	<i>Salaria fluviatilis</i>	ED								
		BOUVIERE	Bouvière	<i>Rhodeus amarus</i>	ED								
		BREME_tot	Brème bordelière	<i>Blicca bjoerkna</i>	ED								
		BREME_tot	Brème d'eau douce	<i>Abramis brama</i>	ED								
		BREME_tot	Brèmes NI	<i>Breme spp</i>	ED								
		CARASSIN COMMUN	Carassin commun	<i>Carassius carassius</i>	ED								
		CARPE_tot	Carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i>	ED								
		CHEVAINE	Chevaine	<i>Squalius cephalus</i>	ED								
		GAMBUSIE	Gambusie	<i>Gambusia affinis</i>	ED								
		GARDON	Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	ED								

GOUJON ASIATIQUE	Pseudorasbora	<i>Pseudorasbora parva</i>
GOUJON	Goujon	<i>Gobio gobio</i>
		<i>Gymnocephalus</i>
GREMILLE	Grémille	<i>cernuus</i>
MUGE_tot	Mugilidés	Mugilidae
PERCHE COMMUNE	Perche commune	<i>Perca fluviatilis</i>
PERCHE SOLEIL	Perche soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>
POISSON CHAT	Poisson-chat	<i>Ameiurus melas</i>
		<i>Scardinius</i>
ROTENGLE	Rotengle	<i>erythrophthalmus</i>
SANDRE	Sandre	<i>Sander lucioperca</i>
SILURE GLANE	Silure glane	<i>Silurus glanis</i>
SYNGNATHE_tot	Syngnathe de lagune	<i>Syngnathus abaster</i>

ED

ED

ED

MM

ED

ED

ED

ED

ED

ED

LG

Tableau A4 : Liste des espèces inventoriées par station d'échantillonnage dans le canal du Fumemorte de 2021 à 2024, dans le cadre du suivi long-terme (une semaine par mois). Pour le groupe écologique : ED = espèce d'eau douce ; LG = lagunaire ; MM = marine migratrice ; MO = marine occasionnelle ; CA = catadrome ; LGM = espèce lagunaire et marine. Case grisée = présence ; case blanche = non détecté.

Subphilum	Classe	Groupe taxonomique	Nom français	Nom scientifique	Groupe écologique	FUME_1	FUME_BON
Crustacea	Malacostraca	CRABE VERT DE MEDITERRANEE	Crabe vert de Méditerranée	<i>Carcinus aestuarii</i>	EM		
		CARIDINE	Caridine	<i>Atyaephyra desmaresti</i>	ED		
		CRABE DE VASE AMERICAIN	Crabe de vase américain	<i>Rhithropanopeus harrisii</i>	ED		
		CREVETTE BOUQUET BALTE	Crevette bouquet balte	<i>Palaemon adspersus</i>	LG		
		CREVETTE BOUQUET	Crevette bouquet	<i>Palaemon serratus</i>	MO		
		CREVETTE DES MARAIS	Crevette des marais	<i>Palaemonetes sp</i>	LG		
		CREVETTE GRISE	Crevette grise	<i>Crangon crangon</i>	EM		
		CREVETTE ROSE	Crevette rose	<i>Palaemon elegans</i>	ME		
		ECREVISSE DE LOUISIANE	Ecrevisse de Louisiane	<i>Procambarus clarkii</i>	ED		
		ABLETTE	Ablette	<i>Alburnus alburnus</i>	ED		
Vertebrata	Actinopterygii	ALOSE FEINTE	Alose méditerranéenne	<i>Alosa agone</i>	AN		
		ANCHOIS	Anchois	<i>Engraulis encrasicolus</i>	MM		
		ANGUILLE	Anguille d'Europe	<i>Anguilla anguilla</i>	CA		
		ATHERINIDAE	Joël	<i>Atherina boyeri</i>	LG		
		BLENNIE PAON	Blennie-paon	<i>Salaria pavo</i>	LG		
		BOUVIERE	Bouvière	<i>Rhodeus amarus</i>	ED		
		BREMES	Brèmes NI	<i>Abramis brama</i> , <i>Blicca bjoerkna</i>	ED		
		BREMES	Brème bordelière	<i>Blicca bjoerkna</i>	ED		
		BREMES	Brème d'eau douce	<i>Abramis brama</i>	ED		

CARASSIN COMMUN	Carassin commun	<i>Carassius carassius</i>	ED	
CARPE COMMUNE	Carpe commune	<i>Cyprinus carpio</i>	ED	
EPINOCHÉ	Epinoche à trois épines	<i>Gasterosteus aculeatus</i>	LG	
GAMBUSIE	Gambusie	<i>Gambusia affinis</i>	ED	
GARDON	Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	ED	
GOBIE NOIR	Gobie noir	<i>Gobius niger</i>	LG	
GOBIES	Gobidés	<i>Pomatoschistus sp</i>	LG	
GOBIES	Gobie buhotte	<i>Pomatoschistus minutus</i>	MM	
GOUJON	Goujon	<i>Gobio gobio</i>	ED	
GOUJON ASIATIQUE	Pseudorasbora	<i>Pseudorasbora parva</i>	ED	
GREMILLE	Grémille	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	ED	
MUGES	Mugilidés	<i>Mugilidae</i>	MM	
PERCHE SOLEIL	Perche soleil	<i>Lepomis gibbosus</i>	ED	
POISSON CHAT	Poisson-chat	<i>Ameiurus melas</i>	ED	
ROTENGLE	Rotengle	<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	ED	
SANDRE	Sandre	<i>Sander lucioperca</i>	ED	
SILURE GLANE	Silure glane	<i>Silurus glanis</i>	ED	
SYNGNATHE CLAIRE	GORGE Syngnathe de lagune	<i>Syngnathus abaster</i>	LG	

Annexe 7 - Détermination de l'âge à l'argentine par otolithométrie

Echantillonnage

Ce volet a permis d'alimenter à la fois le projet COLAGANG, en cherchant à comparer le taux de croissance et l'âge entre individus argentés produits en milieu ouvert (Fumemorte) ou en milieu poldérisé (Grandes Cabanes), ainsi que le projet de thèse d'Amélie Hoste (2021-2024), qui s'intéresse plus globalement à la qualité des individus argentés produits en milieu intra-lagunaire. Dans le cadre de ce projet de thèse, 2 autres sites ont été ciblés : le canal de l'ASA de la Sigoulette et l'étang du Vaccarès. Ces différents sites permettaient de considérer *a priori* des sous-populations d'anguilles soumises à des conditions contrastées en termes de connectivité, de salinité et de contamination chimique.

Les campagnes de pêche ayant permis de capturer les anguilles pour dissection ont été essentiellement réalisées d'octobre à décembre 2021. Ces opérations ont nécessité la mobilisation de nombreuses personnes, les individus devant être disséqués immédiatement après leur capture. Le site des Grandes Cabanes a été échantillonné par les équipes de l'OFB et de la Tour du Valat, avec un appui de l'association MRM et de l'équipe de recherche MIVEGEC (Maladies Infectieuses et Vecteurs: Ecologie, Génétique, Evolution et Contrôle) de l'IRD Montpellier. Le site de la Sigoulette a été échantillonné par pêche électrique et aux filets par l'association MRM, la Tour du Valat, la fédération de pêche des Bouches du Rhône et l'OFB. L'étang du Vaccarès a été échantillonné par la Tour du Valat en partenariat avec la Société Nationale de Protection de la Nature (SNPN) et avec la contribution de deux pêcheurs professionnels, Christian Ribero et Michel Bénézech. Le canal du Fumemorte a été échantillonné par la Tour du Valat.

Une fois capturés, les individus sont mesurés de manière à déterminer leur stade de développement (application de l'indice développé par Durif et al., 2005) et vérifier qu'ils correspondent au type d'individus ciblés pour les dissections (jaune ou argentés, mâle ou femelle). Au total 208 individus dédiés aux prélèvements biologiques (sur les 300 prévues initialement) ont été capturés dans les 5 sites échantillonnés (Tableau A5).

Tableau A5 : Récapitulatif des objectifs de capture par stade de développement et du nombre finalement prélevé pour les dissections (mise à jour du 20/12/2021)

Nom du site	Nb total d'anguilles à prélever		Nb total d'anguilles prélevées au 20/12/2021	
	Nb d'anguilles jaunes	Nb d'anguilles argentées	Nb d'anguilles jaunes	Nb d'anguilles argentées
Marais des Grandes Cabanes	30	30 (15 mâles, 15 femelles)	33 (13 indiff, 9 FII et 11 FIII)	27 (9 mâles, 18 femelles = 17 FV et 1 FIV)
Canal de la Sigoulette	30	30 (15 mâles, 15 femelles)	19 (3 indiff, 7 FII et 9 FIII dont 2 argentées)	16 (1 mâles, 15 femelles = 12 FV, 3 FIV)
La Capelière	/	60 (30 mâles, 30 femelles)	23 (6 FIII jaune et 12 FIII plutôt argentées; 5 FII dont 1 jaune)	43 (11 mâles, 32 femelles = 30 FV, 2 FIV)
Canal du Fumemorte	/	60 (30 mâles, 30 femelles)	/	37 (10 mâles, 27 femelles = 19 FV, 4 FIV et 4 FIII)

En fonction des analyses envisagées (Figure A64), les échantillons ont été prélevés sur des individus et des tissus sélectionnés et ont été conservés et/ou préparés avec des protocoles spécifiques. Les échantillons ont ensuite été adressés à différentes structures :

- Pour la lecture des otolithes et les analyses parasitologiques des branchies et vessie natatoire au CEFREM - Université de Perpignan
- pour les études génétiques et la microchimie des otolithes à l'INRAE de Saint-Pée-Sur-Nivelles,
- pour les analyses cancérologiques à Sophie Labrut, vétérinaire biologiste basée à Rennes, qui a traité les échantillons pour le laboratoire MIGEVEC de Montpellier
- pour le dosage des polluants organiques persistants à l'Université d'Anvers en Belgique.
- Pour le dosage des métaux lourds à l'Université de la Rochelle.

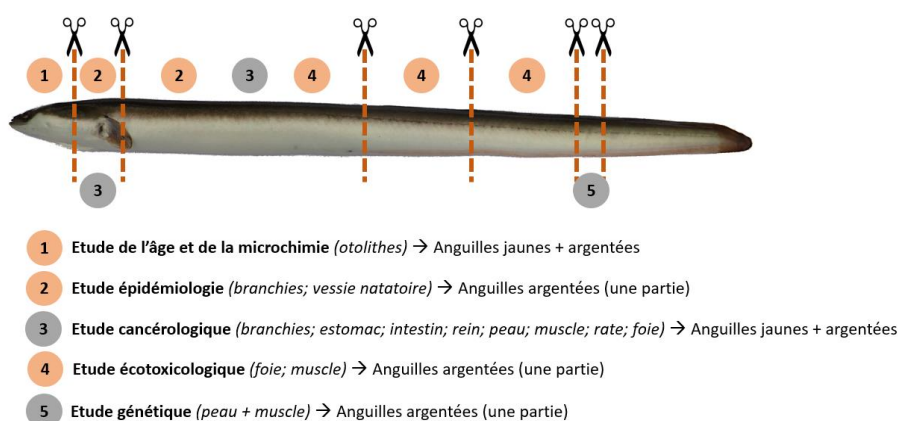


Figure A64 : Localisation des échantillons à prélever par anguille, en fonction de leur stade de développement, pour les études listées. En orange : études intégrées à nos projets ; en gris : études de nos partenaires.

Lecture des otolithes

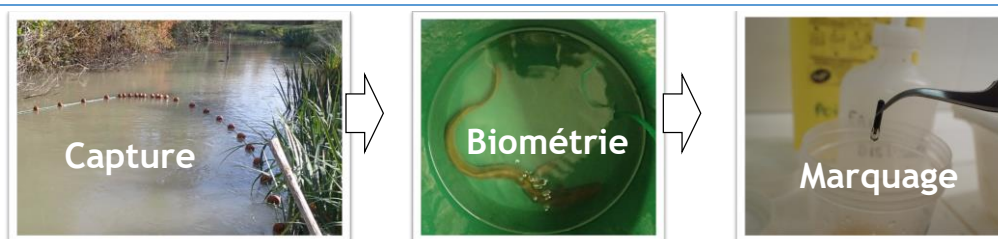
Les otolithes sont des concrétions calcaires localisées dans l'oreille interne des poissons qui jouent un rôle important dans l'équilibration. Chaque individu possède trois paires d'otolithes : la sagitta, la lapillus et l'asteriscus et c'est la plus grande paire, la sagitta, qui est utilisée pour la lecture de l'âge. L'otolithe se forme par des dépôts calcaires successifs (cristaux d'aragonite) au sein d'une matrice de protéine fibreuse, l'otoline. Ses dépôts sont différents selon les saisons. En été, la formation d'aragonite est accélérée en raison de la plus grande disponibilité en calcium dans le milieu, créant une zone translucide (qui apparaît sombre en lumière réfléchie). Tandis qu'en hiver, une zone opaque se forme (qui apparaît blanche en lumière réfléchie) (Panfili 2002).

De janvier à juin 2022, le stage de Master 2 de Hugo Vay Peyre, co-encadré par l'OFB, la Tour du Valat et le CEFREM / Perpignan Université, a permis de déterminer l'âge et les taux de croissance de 198 individus par otolithométrie (Vey-Payre 2022). L'extraction des otolithes a été réalisée en laboratoire à la Tour du Valat et la lecture d'âge au CEFREM / Perpignan Université. Sur chaque paire d'otolithes, un seul, choisi de manière aléatoire, a été lu avec une méthode qui permet de faciliter la lecture des stries de croissance. L'otolithe est immergé dans de l'huile à immersion et observé sous la loupe binoculaire en lumière réfléchie sur fond noir, permettant l'observation *in toto* des stries de croissance. Lorsque le comptage *in toto* est trop complexe ou que le nombre de stries est élevé (> 5), l'otolithe est fixé dans une résine en plan sagittal, poncé, poli et coloré.

Une analyse comparative de la forme des otolithes entre les différents sites échantillonnés a également été réalisées pendant ce stage.

En 2023, Juliette Siréjol a effectué son stage de Master 2 pour analyser la microchimie des otolithes, en utilisant le deuxième otolithe de chaque paire non utilisée dans le cadre du stage précédent. L'analyse microchimique des otolithes a permis de mieux connaître l'histoire de vie des individus prélevés, et notamment de savoir s'ils ont surtout grandi en milieu d'eau douce, saumâtre, salé ou s'ils ont alterné les types d'habitats. Ce stage a été réalisé en partenariat avec l'INRAE de St Pée-sur-Nivelle dans le cadre de la thèse d'Amélie Hoste.

Annexe 8 - Biométrie & Marquage RFID



Une fois capturée, les anguilles sont acheminées au stand de biométrie. Afin d'être manipulée, chaque anguille est anesthésiée à l'aide d'un bain à la benzocaïne (Figure A65). Une fois endormie, elle est mesurée (longueur totale, longueur de la nageoire pectorale, diamètres horizontaux et verticaux des yeux) et pesée (Figure A65). Ces mesures permettent de déterminer son stade de développement (indice Eelrep, Durif et al. 2005). Les critères visuels relatifs à l'argenture sont également relevés (aspect général, développement de la ligne latérale avec les neuromastes et couleur contrastée entre le dos et le ventre, Figure A65). Enfin, son état sanitaire externe est évalué (Pénil, C. et al. 2011).

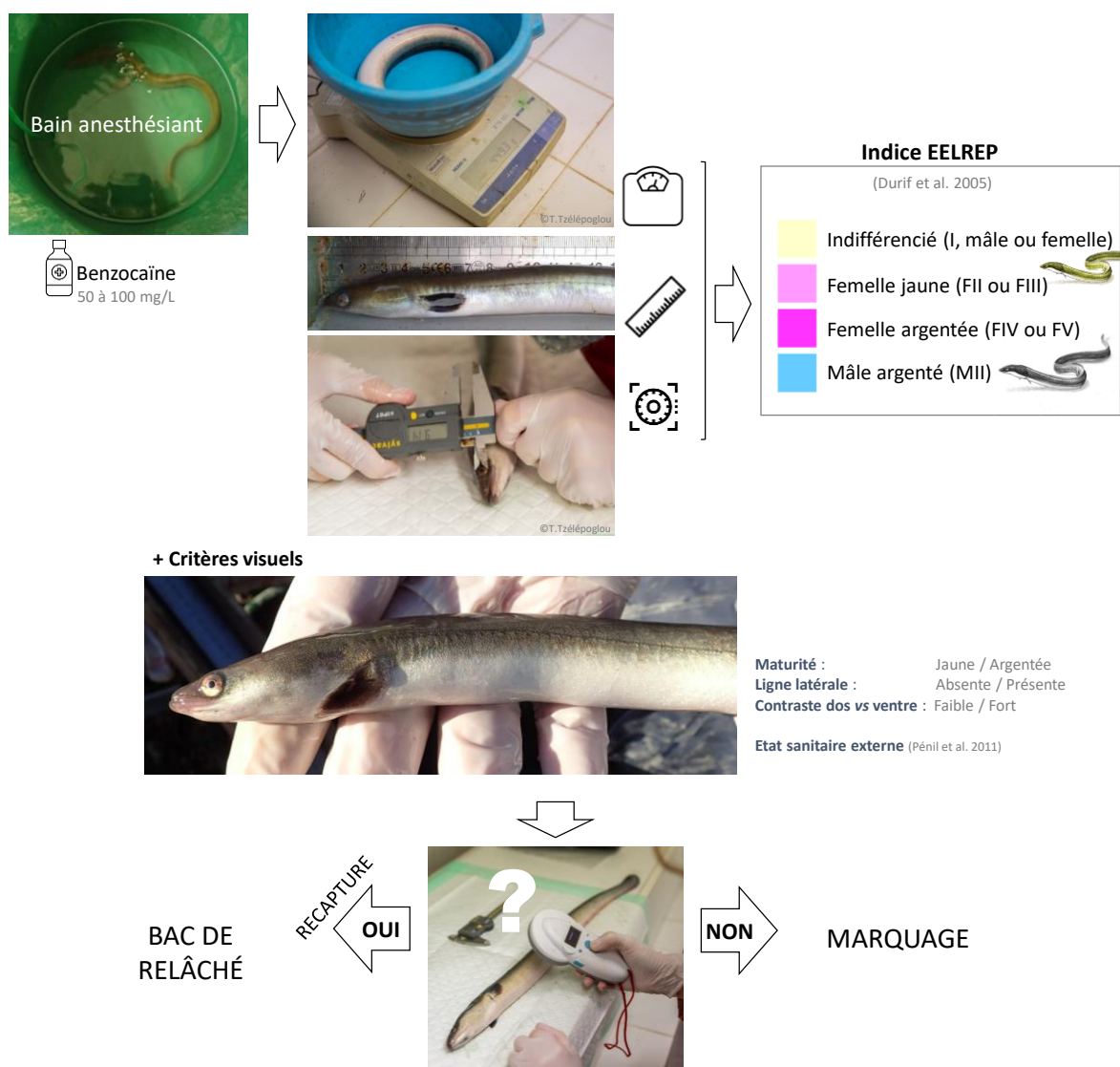


Figure A65 : Illustration du passage d'une anguille au stand de biométrie et des données relevées

Chaque individu est scanné avec un lecteur portatif pour vérifier s'il n'a pas déjà été capturé et marqué (Figure A65). Si un individu est déjà marqué (c'est une recapture), il est placé dans le bac de relâcher. De même, s'il s'agit d'un individu trop petit pour le marquage (inférieur à 18 cm de long et ou à 15g), l'individu ne sera pas marqué et il est directement relâché.

Si un individu n'est pas marqué et qu'il a une taille supérieure à 18 cm (et un poids supérieur à 15g), l'individu sera marqué à l'aide d'une petite opération dont la gravité est jugée faible à modérée. Afin de soulager la douleur, une dose d'analgésique (lurocaïne) est localement injectée (Figure A66). La marque utilisée est un transpondeur qui se présente sous la forme d'une capsule en verre biocompatible incorporant un circuit intégré inerte (sans batterie, Figure A65). L'impact du transpondeur sur un individu est négligeable lorsque sa masse est inférieure à 2.5% de celle du poisson.

Les individus inférieurs à 30 cm et/ou à 60 g sont marqués avec un transpondeur de 12 mm de long (0.1 g), inséré en intramusculaire à l'aide d'un trocart (Figure A66). Ces puces ne sont pas compatibles avec la technologie RFID, sauf à partir de 2023, uniquement dans le bassin des Grandes Cabanes. Ces puces sont beaucoup moins bien détectées que les puces de 23 mm de long, néanmoins, si l'individu nage au plus près de l'antenne, son passage peut être enregistré.

Les individus qui ont une condition sanitaire satisfaisante et qui ont une longueur supérieure à 30 cm et un poids supérieur à 40 g (Figure A66) sont marqués avec des puces de 23 mm de long (0.6 g) par laparotomie, ce qui nécessite une incision avec un scalpel pour atteindre la cavité abdominale. Avant d'être opérés, les individus sont immergés dans un bain anesthésiant deux fois plus concentré. Une fois la marque désinfectée et insérée, la plaie est recouverte d'un pansement hydrofuge.

Tous les individus marqués sont ensuite placés dans un bac de réveil et gardés sous surveillance jusqu'à leur réveil. Une fois que les individus ont retrouvé une nage active, ils sont relâchés dans leur milieu à des sites spécifiques en fonction de leur site de capture (Figure 9 et Figure 10). Les individus qui sont recapturés avec une puce de 12 mm et qui ont dépassé les 30 cm et 40 g sont marqués à nouveau avec une puce de 23 mm. Il arrive donc que des individus soient double marqués.

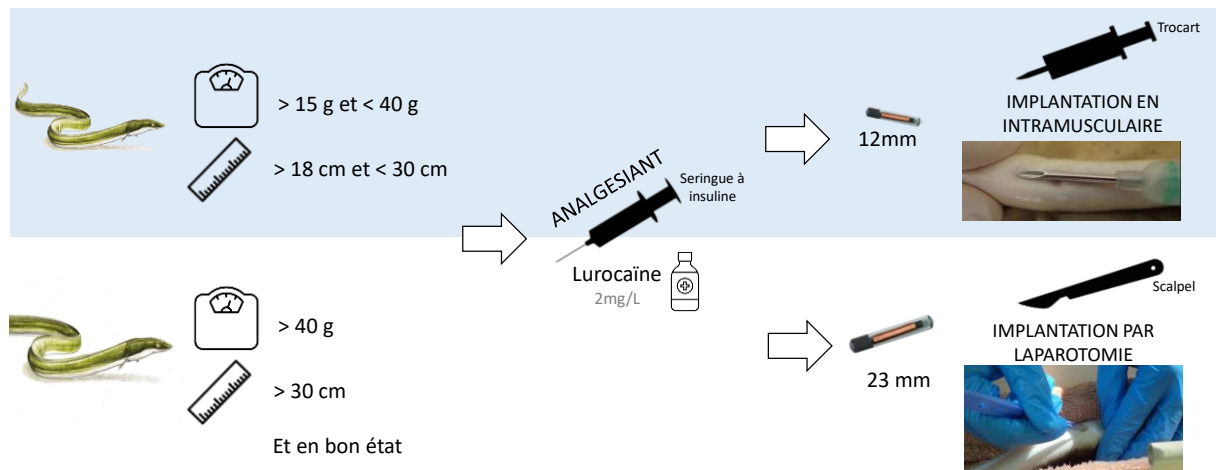


Figure A66 : Type de marquage en fonction de la taille et du poids de l'individu et application d'un analgésique.

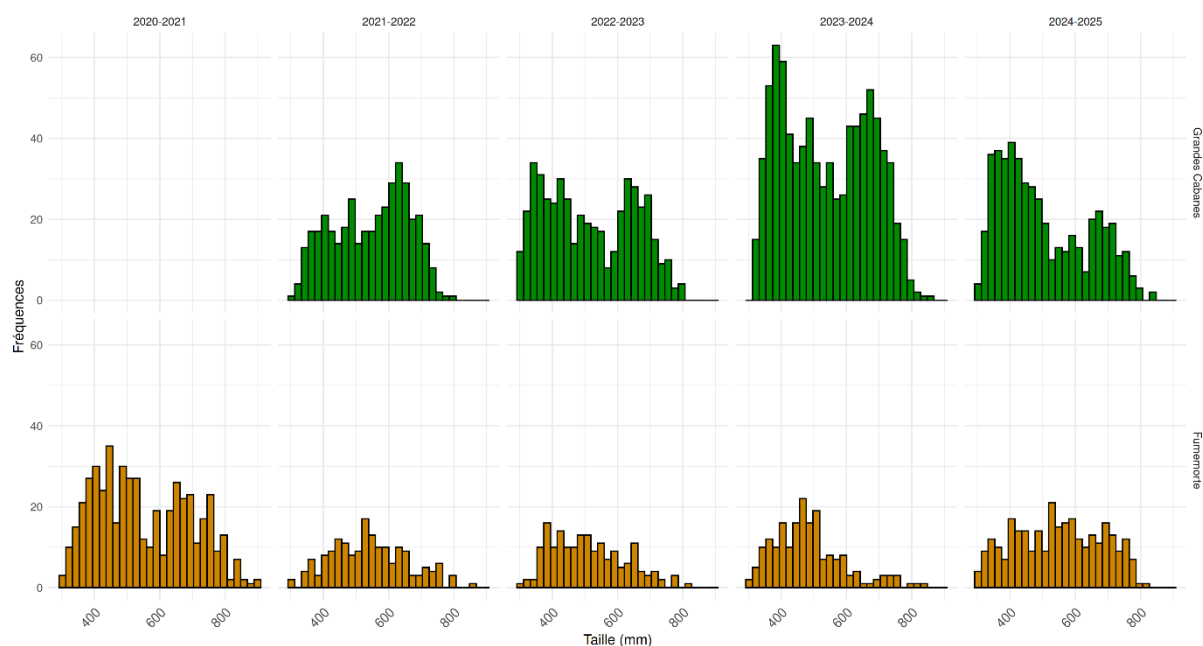


Figure A67 : Spectre de taille des individus marqués avec un transpondeur RFID de 23mm de long par année de suivi (en haut) aux Grandes Cabanes et (en bas) au Fumemorte.

Alors que nous atteignons largement les objectifs de marquage aux Grandes Cabanes (~450 individus par an, Figure A68 et Tableau A6), ils ne l'ont jamais été du côté du Fumemorte ($n < 300$ par an, Figure A68 et Tableau A7).

En avril 2024, un nombre plus élevé d'anguilles ont été doublement marquées ($n=32$), avec un petit tag de 12 mm en intramusculaire et un tag de 23mm par laparotomie (Figure A68). Cette hausse de double marquage est liée au fait que nous avons choisi de ne pas marquer ces individus, déjà supérieurs à 30 cm en novembre 2023, car nous risquions d'avoir insuffisamment de tags et de quotas pour finir la saison. En mars 2024, le nombre élevé d'anguilles capturées aux Grandes Cabanes était dominé par les anguilles de petites tailles (< 30 cm). La limite de marquage pour le tag de 12 mm en intramusculaire a alors été décalée à une taille minimale de 20 cm. Malgré ce choix, le stock de tags de 12 mm répondant à la technologie RFID a alors été épuisé ($n=465$ tags de 12 mm posés) et nous avons dû compléter avec des tags de 12 mm non RFID (+ 332 tags 12mm posés, Tableau A6). Le stock a ensuite été renouvelé.

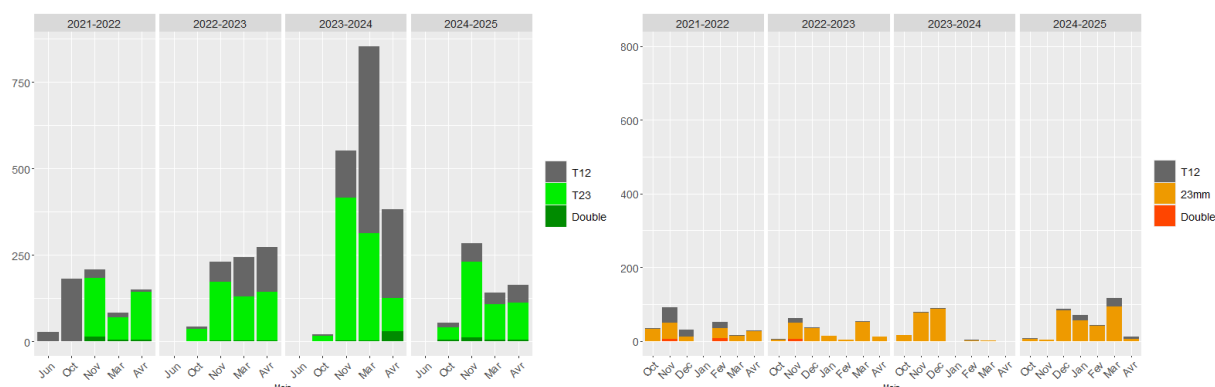


Figure A68 : Nombre d'individus marqués par mois avec des tags de 12mm (T12) et/ou de 23 mm (T23), aux Grandes Cabanes et dans le canal du Fumemorte. Double = individus double marqués.

Tableau A6 : Récapitulatif du nombre d'anguilles capturées et marquées par saison d'échantillonnage à la pêche électrique ou au filet pour le bassin des Grandes Cabanes.

Année de suivi	Saison	Type de pêche	Total captures	Nb d'individus non mesurés	Nb argentées femelles	Nb argentées mâles	Nb marqués	Nb de marques 12 mm	Nb de marques 12 mm RFID	Nb de marques 23 mm RFID	Nb de recaptures	Nb d'individus double marqués
2021-2022	Oct-Nov	Pêche électrique	4	0	0	0	4	0	0	4	0	0
		Filet	396	0	47	8	387	207	0	180	21	13
	Mar-Avr	Pêche électrique	35	0	0	0	29	4	0	25	3	0
		Filet	229	0	28	4	203	14	0	189	25	9
2022-2023	Oct-Nov	Pêche électrique	17	0	4	0	16	4	0	12	1	0
		Filet	303	0	38	6	257	60	0	197	15	3
	Mar-Avr	Pêche électrique	171	0	1	1	127	49	49	78	10	0
		Filet	527	0	34	10	390	193	193	197	46	5
2023-2024	Oct-Nov	Pêche électrique	23	0	2	0	19	4	4	15	4	0
		Filet	688	65	137	22	555	136	136	419	32	2
	Mar-Avr	Pêche électrique	7	0	1	0	3	0	0	3	4	0
		Filet	1850	0	216	28	1233	797	465	436	320	33
2024-2025	Oct-Nov	Pêche électrique	3	0	0	0	3	1	1	2	0	0
		Filet	471	26	96	20	333	66	65	267	54	15
	Mar-Avr	Pêche électrique	11	0	0	0	22	3	1	19	5	1
		Filet	343	6	15	3	282	81	71	201	44	9
TOTAL			5078	97	619	102	3863	1619	985	2244	584	90

Tableau A7 : Récapitulatif du nombre d'anguilles capturées et marquées par an au filet pour le bassin du Fumemorte depuis 2018.

Année	Saison	Total captures	Nb ind. non mesurés	Nb argentées femelles	Nb argentées mâles	Nb Marques posées	Nb marques 12mm	Nb marques 23mm RFID	Nb recaptures	Nb individus double marqués	
2018	Jan-Fev	307	0	64	1	205	215	0	58	0	
2018	Mar-Avr	115	0	20	3	64	66	0	25	0	
2018	Oct-Nov-Dec	147	0	35	10	114	16	99	42	22	
2019	Jan-Fev	123	0	34	9	96	39	63	33	13	
2019	Mar-Avr	80	0	4	4	70	28	43	15	7	
2019	Oct-Nov-Dec	56	0	9	1	44	4	40	19	8	
2020	Jan-Fev	15	0	5	0	10	0	10	7	2	
2020	Mar-Avr	91	0	22	2	53	17	36	35	2	
2020	Oct-Nov-Dec	67	0	2	3	47	3	45	18	6	
2021	Jan-Fev	67	0	11	1	47	1	46	26	7	
2021	Mar-Avr	276	0	126	8	199	105	105	67	6	
2021	Oct-Nov-Dec	187	0	9	0	131	42	94	54	6	Démarrage du projet COLAGANG
2022	Jan-Fev	70	0	17	0	51	25	34	19	8	
2022	Mar-Avr	66	0	5	0	49	4	45	17	6	
2022	Oct-Nov-Dec	144	0	9	0	105	19	91	37	7	
2023	Jan-Fev	24	0	5	0	18	0	18	2	0	
2023	Mar-Avr	92	0	6	3	71	3	68	20	5	
2023	Oct-Nov-Dec	232	0	14	1	190	2	188	39	9	
2024	Jan-Fev	4	0	2	0	4	2	2	0	0	
2024	Mar-Avr	2	0	1	0	1	0	1	0	0	
2024	Oct-Nov-Dec	130	0	23	3	100	4	96	20	4	
2025	Jan-Fev	150	0	32	1	115	18	97	31	1	
2025	Mar-Avr	176	0	13	4	128	28	100	47	1	
TOTAL		2621	0	468	54	1912	641	1321	631	120	
TOTAL depuis aut. 2021		1277	0	136	12	963	147	834	286	47	

Annexe 9 – La télémétrie RFID

Le principe

Un système RFID (*Radio Frequency IDentification*) permet de détecter des individus marqués directement dans leur milieu naturel, sans nécessité de recapture. Ce système permet de suivre le passage d'individus en continu à des stations d'écoute fixes ou de manière temporaire à l'aide de stations d'écoute mobiles. Cette méthodologie s'est avérée efficace pour l'étude des déplacements de l'anguille sur d'autres étendues d'eau telles que le lac de Grand-Lieu (Trancart et al. 2017).

Chaque marque (ou transpondeur ou puce ou *PIT-tag*) posée sur un individu possède un code unique. Ce code unique est lu lors de son activation par un champ électromagnétique qui est produit par les antennes RFID positionnées à chaque station d'écoute (Annexe 10). Les antennes sont des cadres qui sont placés en travers du cours d'eau. La lecture et l'enregistrement des marques se fait lors du passage de l'individu marqué en travers de ces antennes.

Composition d'un dispositif RFID

Une station RFID est constituée d'une à quatre antennes immergées dans l'eau, d'un coffret RFID qui permet d'activer le champ électromagnétique et d'enregistrer les marques détectées, et d'une source d'alimentation (panneaux solaires avec batteries, batteries qui doivent être régulièrement rechargées, ou connexion au réseau électrique). En particulier, un dispositif RFID est composé des éléments suivants (Figure A69) :

- Une alimentation électrique basse tension 12V
- Un lecteur-enregistreur RFID Stream Innov©
- Du câble twinax reliant le lecteur RFID aux tuners des antennes
- Un tuner par antenne destiné à régler le champ magnétique de chaque antenne
- Une ou deux antennes de détection
- Une marque-test (maker tag) par antenne pour contrôler son bon fonctionnement
- Un module de transfert des données à distance qui permet de récupérer et d'envoyer quotidiennement les données enregistrées sur serveur et de veiller en continu au bon fonctionnement des installations.

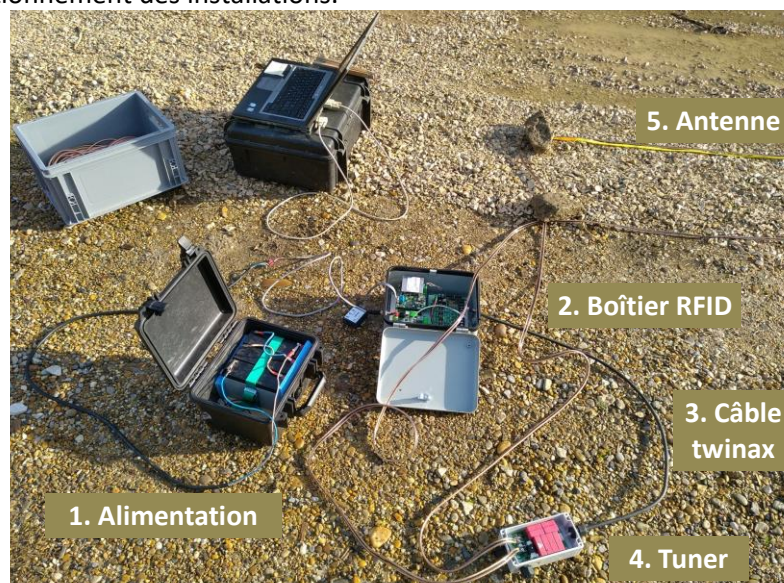


Figure A69 : Dispositif de détection Half Duplex en RFID. Montage expérimental réalisé à terre lors d'une formation suivie auprès du bureau d'études SCIMABIO (11/2018© DNS).

La technologie RFID présente plusieurs intérêts :

- Miniaturisation des marques (12, 23, 32 mm) qui permet de marquer un large panel de taille/âge d'individus. (Marquage d'anguilles dès 30 cm avec des marques de 23mm de longueur) ;
- Coût réduit des marques qui permet de suivre un nombre important d'individus et d'augmenter ainsi la robustesse statistique des données produites ;
- Durée de vie illimitée des marques qui permet la mise en place de suivi sur le long terme ;
- Large adaptabilité en termes de design d'antennes : les antennes sont conçues à partir de matériaux simples et peu onéreux directement sur le terrain ;
- Faible consommation électrique permettant le déploiement de dispositifs en milieu isolé avec des systèmes d'alimentation autonomes (batteries, panneaux solaires) ;
- Enregistrement du passage d'individus marqués en continu ;
- Possibilité de télécommunication avec les installations RFID et surveiller ainsi à distance leur état de fonctionnement.

Les installations RFID nécessitent en effet d'être régulièrement visitées afin de vérifier leur bon fonctionnement. Les problèmes qui peuvent être rencontrés seront essentiellement liés à la présence d'éléments perturbateurs du champ électromagnétique, par exemple du métal, un réseau électrique ou une radio CB.

Annexe 10 – Installation des stations d’écoute RFID fixes

Canal du Fumemorte

Dans le canal du Fumemorte, deux stations d’écoute RFID ont été installés en 2018 par le bureau d’études Scimabio Interface, dans le cadre de l’action MA8 du Contrat de delta Camargue 2017-2019 (Giraud 2021, Mollier 2021, Nicolas et al. 2021). Ces deux stations RFID ont été mises en fonctionnement en février 2019. La première est localisée au cœur de la zone où les anguilles du canal du Fumemorte sont capturées et marquées, au niveau du pont des Garcines, et la deuxième est située à proximité de l’embouchure du canal dans l’étang du Vaccarès (Figure 16). L’équipement de ce canal, un milieu relativement profond pour la technologie RFID, qui plus est influencé par des remontées saisonnières d’eaux saumâtres ou salées en provenance de l’étang du Vaccarès, était une première et a nécessité plusieurs ajustements pour bénéficier d’un fonctionnement optimal. Cette expérience avait permis de valider l’alimentation électrique sur panneaux solaires en Camargue. Néanmoins, le champ électromagnétique des antennes avait montré des dysfonctionnements qui n’avaient pas pu être résolus avec le budget alors alloué. Les derniers ajustements ont pu être réalisés en juin 2022 et en mars 2023 grâce à l’obtention du nouveau financement COLAGANG et de l’intervention du bureau d’études Scimabio Interface.

Station Fume-Amont

La station amont (au niveau du pont des Garcines) est équipée de deux séries de deux antennes qui permettent d’avoir une information sur le sens de passage des poissons (Figure A69). Deux containers en bois ont été spécialement fabriqués afin d’y fixer les panneaux solaires et d’abriter les malles contenant le matériel électronique (coffrets RFID, batteries, Figure A69). Initialement, chaque jeu de deux antennes, amont et aval, étaient chacun relié à son propre coffret RFID, et ces deux coffrets RFID étaient synchronisés. Néanmoins, la présence de ferraille dans le pont perturbait ce dispositif et les deux coffrets ont finalement été remplacés à l’automne 2021 par un boîtier multiplex, permettant de relier l’ensemble des 4 antennes. Les antennes sont depuis interrogées l’une après l’autre (plusieurs fois par seconde) et le fonctionnement s’est nettement amélioré. Par conséquent, l’installation ne nécessitant plus que deux panneaux solaires et de deux batteries, le matériel disponible (deux panneaux solaires, une malle, un cabanon, un boîtier RFID et deux batteries) a été déménagé aux Grandes Cabanes en juin 2022 pour équiper la station aval de ce site (Figure A71).

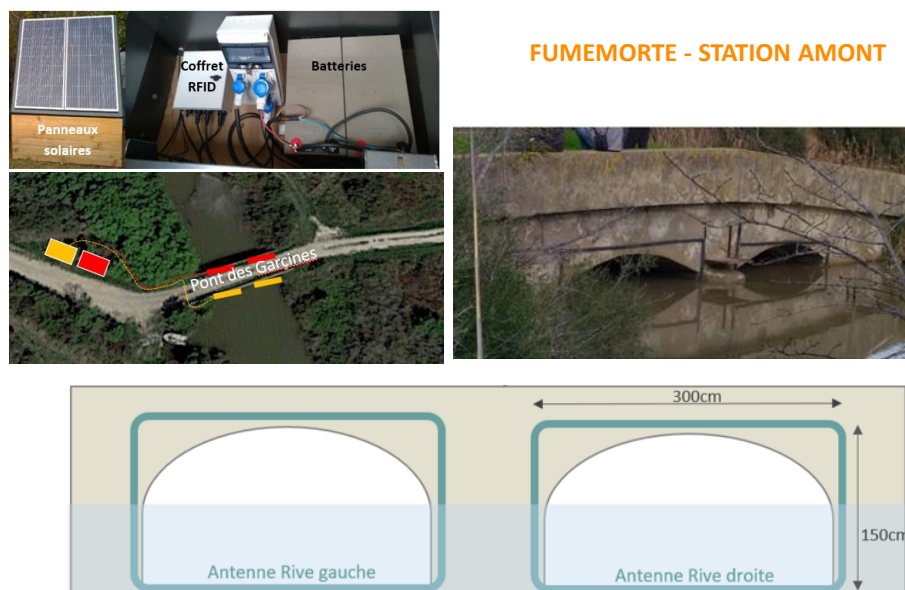


Figure A70 : Illustrations de la station d'écoute RFID dénommée « Fume-Amont » sur le canal du Fumemorte, au niveau du pont des Garcines.

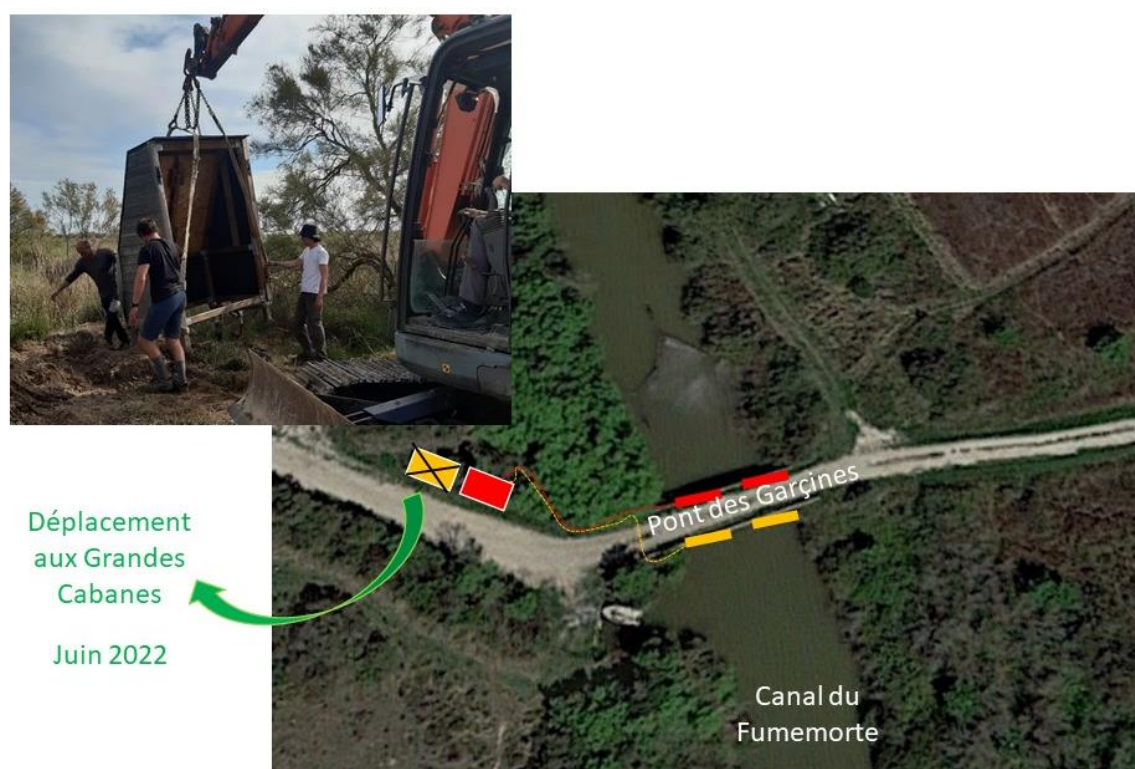


Figure A71 : Déplacement du cabanon RFID du pont des Garcines aux Grandes Cabanes

Station Fume-Aval

La station RFID localisée à proximité de l'embouchure du bassin du Fumemorte est constituée de quatre antennes disposées en parallèle afin de couvrir la totalité de la section du canal, particulièrement large (environ 10 m) et profonde (jusqu'à 1.5 m de fond) à cet endroit (Figure A72). Afin d'optimiser la probabilité de détection des individus marqués et d'obtenir le sens de passage des individus, il était convenu d'installer un second rang d'antennes à quelques mètres en aval de la station

déjà en place (Figure A73). Scimabio Interface est intervenu en février 2023 pour tester cette nouvelle station. Malheureusement, cette installation n'a pas été concluante, étant trop éloignée de la source en énergie, trop proche de la station déjà en place et influencée par une trop grande conductivité du milieu. Il a donc été décidé d'abandonner cette option. Par contre, afin d'optimiser le fonctionnement de la station déjà en place, la configuration des antennes de la station existante a été revue et les antennes abaissées (Figure A74).



Figure A72 : Représentation de la station RFID dénommée « Fume-Aval »



Figure A73 : Localisation envisagée pour le second rideau d'antennes à l'aval du canal du Fumemorte. Source du fond : Géoportail



Figure A74 : Reconfiguration des antennes de la station d'écoute RFID « Fume-Aval » au canal du Fumemorte par Scimabio Interface en Mars 2023

Bassin des Grandes Cabanes

Le bureau d'études Scimabio Interface est intervenu au printemps 2022 pour installer les 4 stations d'écoute RFID aux Grandes Cabanes, permettant de couvrir la connexion gravitaire au Petit Rhône, les deux sorties vers le canal de l'ASA de la Sigoulette (dénommées 'Ivrognes' et 'Pompe') et la future reconnexion avec l'étang du Vaccarès (Figure 16).

Station GC-Amont

La station amont est située juste à l'aval de la prise d'eau gravitaire au Petit Rhône. Cette station est équipée de deux antennes positionnées en travers du canal afin de pouvoir avoir une information sur le sens de passage des poissons. Elle est alimentée par le réseau électrique, accessible sur le site en raison de la présence de la station de pompage d'irrigation (Figure A75).

Station
Petit Rhône



Figure A75. Photographies de la station RFID du Petit Rhône, ici dénommée « GC-Amont », aux Grandes Cabanes © C. Tetrel

Station Ivrognes et Pompe

Les stations localisées au niveau des deux sorties vers le canal de la Sigoulette sont chacune constituées d'une seule antenne RFID (Figure A76). La sortie d'Ivrognes est équipée d'un clapet anti-retour, contrairement à la sortie Pompe. La station Pompe est mise en fonctionnement uniquement lorsque la martelière est ouverte. Ces deux stations étaient chacune alimentées par trois batteries qui devaient être remplacées toutes les trois semaines. Chaque batterie pesant 60 kg, c'était une manipulation très pénible. Le nouveau financement de la CNR obtenu a permis d'équiper ces deux stations avec des panneaux solaires le 31 juillet 2024 et d'éviter cette tâche.



Station Ivrognes

Station
Pompe



Figure A76 : Photographies des stations RFID Ivrognes et Pompe aux Grandes Cabanes, en haut alimenté par batteries et en bas par panneau solaire © C. Tetrel

Station GC-Aval

La station RFID localisée sur le canal de la reconnexion avec l'étang du Vaccarès est constituée de deux antennes, pour avoir le sens de passage des poissons, et est alimentée par l'énergie solaire (avec le matériel récupéré sur le bassin du Fumemorte, Figure A77). Pendant les travaux de reconnexion, les antennes ont été démontées, puis réinstallées juste après (Figure A78).



©C. Tetrel



Station « Vaccarès »

Figure A77 : Photographies de la station RFID dénommée « GC-Aval » car localisée sur le canal de la future reconnexion avec l'étang du Vaccarès aux Grandes Cabanes © C. Tetrel



Figure A78 : Photographies de la station RFID dénommée « GC-Aval » après les travaux de reconnexion © C. Tetrel

Annexe 11 – Suivi de l'état de fonctionnement des stations d'écoute RFID fixes

Le fonctionnement et l'efficacité des stations d'écoute RFID fixes sont susceptibles d'évoluer au cours du temps, en raison de problèmes techniques et des variations des conditions du milieu. Trois sources d'information ont été utilisées pour chercher à diagnostiquer l'état de fonctionnement de ces stations (Figure A79):

- ① les détections des marker-tags ;
- ② les tests manuels de portée de détection ;
- ③ l'enregistrement de détections d'individus marqués.

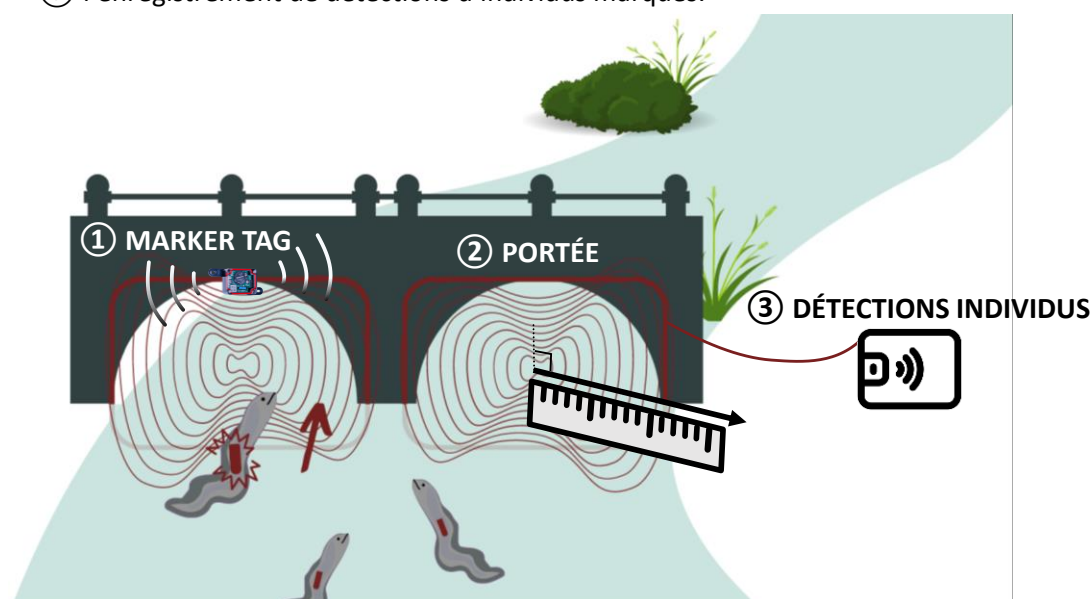


Figure A79 : Illustration des trois principales sources d'information pour caractériser l'état de fonctionnement des stations d'écoute RFID.

Détections des marker-tags

Les “marker-tags” sont des marques qui peuvent être activées à un pas de temps fixé, 30 minutes dans notre étude. Toutes les antennes installées ont été équipées d'un marker-tag : un petit boîtier contenant ce marker-tag est apposé sur chaque antenne. Seule l'antenne aval de la station GC-Amont (au niveau de la prise d'eau au Petit Rhône) n'est pas été munie de marker-tag. Les détections de marker-tags sont enregistrées en continu par les coffrets RFID. Pour chaque 24h, un total de 48 détections du marker-tag associé à l'antenne est donc attendu par antenne.

Sur les stations où plusieurs antennes sont très proches, des marker-tags peuvent être entendus par les antennes voisines, ce qui nécessite un tri des données. Cela implique également qu'un individu marqué qui passe dans une antenne peut être en fait enregistré par une des antennes voisines. Par rapport aux 48 détections attendues, un pourcentage de détections des marker-tags a été calculé par jour et par antenne (Figure A80).

Au sein de la même station RFID, le fonctionnement des antennes peut différer. C'est le cas de la station Fume-Aval où les antennes de la rive droite ont une efficacité de détection des marker-tags en moyenne supérieure à celles de la rive gauche (Figure A80). Globalement, une amélioration de la détection des marker-tags a été constatée suite à l'intervention de Scimabio Interface lors de reconfiguration des antennes en mars 2023 (Figure A80).

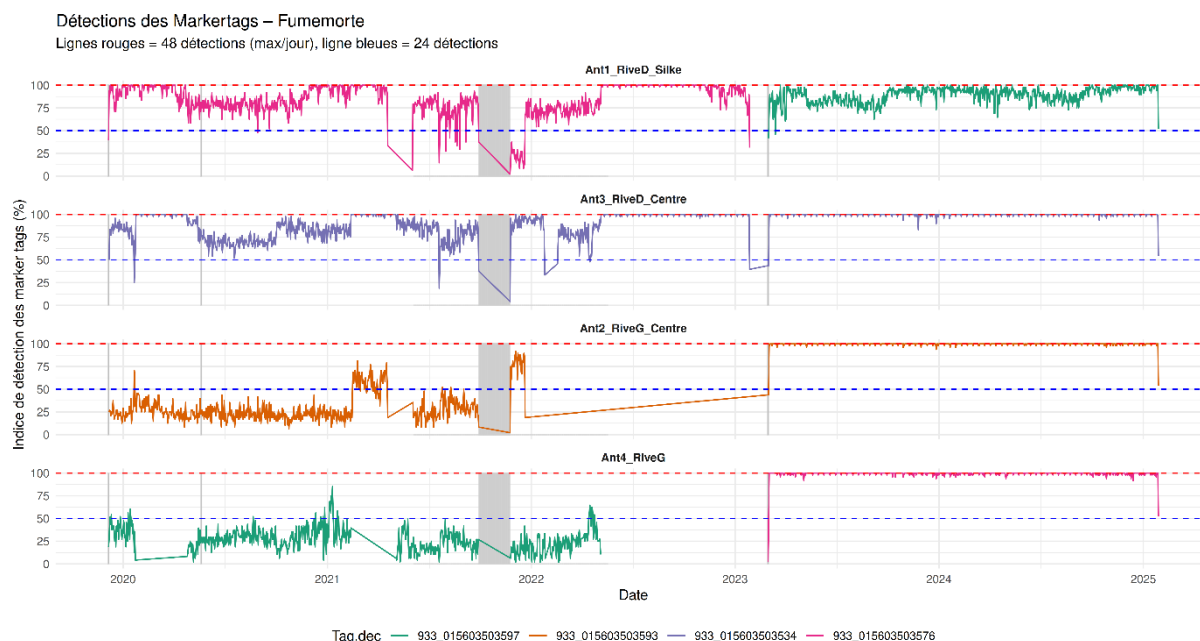


Figure A80 : Pourcentage des détections de marker-tags par antenne pour la station de Fume-Aval au cours du temps

Afin de synthétiser l'information à l'échelle de la station, notamment pour la station Fume-Aval qui a 4 antennes juxtaposées, un pourcentage de détections des marker-tags à l'échelle de la station a été calculé. Un pourcentage de 50% de détections des marker-tags dans ce cas-là implique soit que toutes les antennes détectent la moitié des détections attendues, soit que 2 antennes sur les 4 fonctionnent correctement.

Un dysfonctionnement du marker-tag a été identifié pour l'antenne aval du Vaccarès au printemps 2025, après avoir été immergé. Ce marker-tag était devenu en permanence actif et il a alors été retiré afin de limiter les interférences avec des éventuelles détections d'individus marqués.

Tests manuels de portée de détection

Régulièrement, des tests de portée de détection ont été réalisés manuellement afin d'avoir une estimation de la distance du champ émis par chaque antenne et de quantifier si éventuellement une zone au milieu de l'antenne n'est pas couverte par ce champ. Une puce positionnée à l'extrémité d'une perche est éloignée progressivement de l'antenne (Figure A81) et un bipper relié au coffret RFID permet de savoir à partir de quelle distance la puce n'est plus détectée : le bipper se tait.



Figure A81 : Mesure de la portée de détection au niveau de la station aval du canal du Fumemorte.

A partir de l'automne 2021, ces tests ont été réalisés dans la mesure du possible une fois par semaine sur le canal du Fumemorte. Sur le site des Grandes Cabanes, les tests de portée de détection des stations d'Ivroignes et de Pompe n'ont pas été réalisés et ceux des stations de Vaccarès et Petit Rhône ont été réalisés de manière éparse, par manque de moyen humain et de problèmes d'accessibilité (niveau d'eau trop important).

Les portées de détection s'élèvent en général à 40-75 cm lorsque le dispositif fonctionne bien (Figure A80). Lors de remontées de salinité, de fortes variations de température et de niveaux d'eau, les portées de détection peuvent chuter très fortement. Le redémarrage du coffret permet, en général, d'améliorer les portées de détection et donc de retrouver un meilleur fonctionnement. Depuis Mars 2023, les tests de portée de détection ont été réalisés dans l'eau en surface et au milieu de la colonne d'eau, et pour ces deux hauteurs d'eau, la salinité était mesurée.

Afin de mieux suivre en continu les portées de détection, de nouveaux marker-tags pourraient être installés à une distance et hauteur connue d'au moins une antenne par station d'écoute. L'acquisition de ces nouvelles données en continu pourrait éventuellement permettre de mieux comprendre l'influence des variables environnementales (niveau d'eau, salinité, température, etc.) sur le fonctionnement des stations.

Enregistrements de détection d'individus marqués

Les enregistrements de détection RFID par antenne ont été explorés, afin de vérifier, si, lorsque le pourcentage de détection des marker-tags et/ou les portées de détection sont faibles, des individus marqués sont néanmoins détectés (Figure A82). Il peut en effet arriver que les portées de détection soient observées quasi-nulles, et pourtant des détections ont été enregistrées. Cela peut s'expliquer par le positionnement dans la colonne d'eau d'un individu au moment de son passage : un individu qui frôle les antennes aura plus de chance d'être détecté. Par ailleurs, les tests de portée de détection sont réalisés très ponctuellement, à un moment précis d'une journée. Or, il est possible qu'en quelques heures, ces portées varient. Ici, aucune corrélation n'a été obtenue entre les détections d'individus, le pourcentage de détection des marker-tags et les distances de portée de détection (test de corrélation de Pearson réalisé pour chaque antenne, $r < 0.7$, Figure A82).

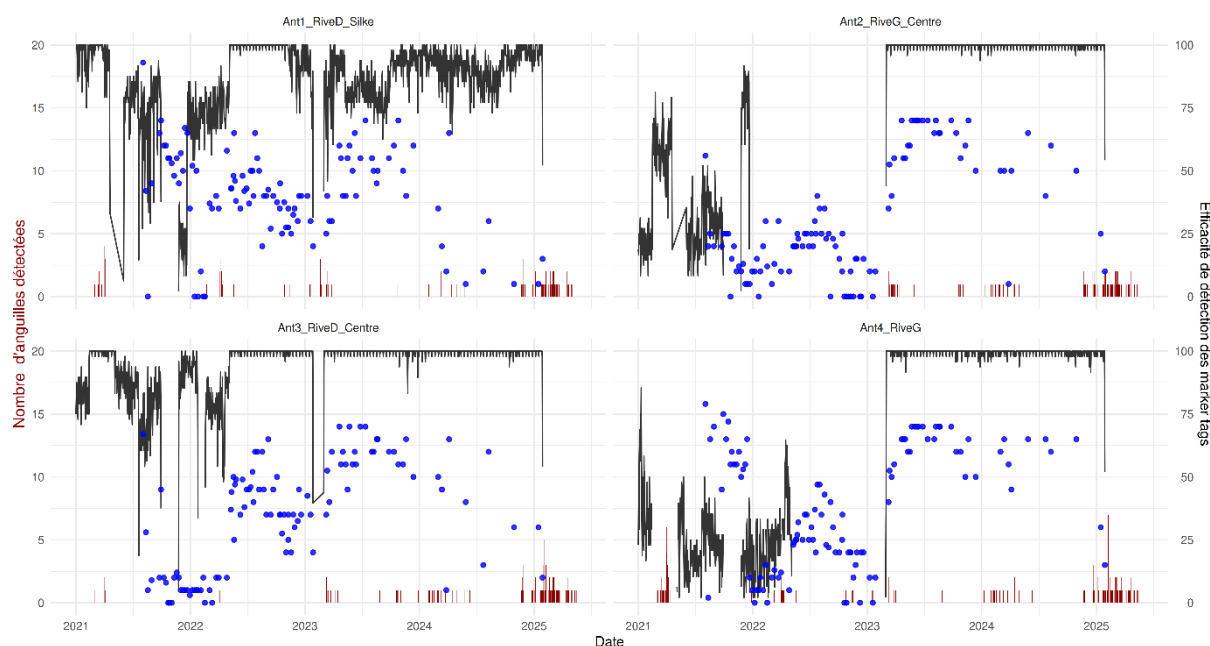


Figure A82 : Nombre d'anguilles détectées (en rouge) et pourcentage de détection des marker tags (en noir), et portée de détection obtenue manuellement en surface (en bleu) au cours du temps pour les 4 antennes de la station RFID du Fume-Aval depuis 2021.

Etat de fonctionnement des stations RFID

Les trois sources d'information décrites au-dessus ont été combinées pour évaluer l'état de fonctionnement des stations au cours du temps (Figure A83). Au final, pour chaque station et par jour, un dysfonctionnement a été considéré lorsque :

- Aucun enregistrement de marker-tags était disponible (absence de données) ;
- Moins de 50% de détections de marker-tags ont été obtenus à l'échelle de la station ;
- Une portée de détection inférieure à 10 cm (pour le jour où la mesure a été réalisée) et aucunes détections d'individus marqués.

L'été, les anguilles étant moins mobiles, très peu de détections aux stations RFID ont été observées. C'est la saison où les tests manuels de portée de détection ont été les moins fréquents. Si durant cette période, un faible taux de détection des marker-tags (<0.5) était enregistré, une station était alors considérée dysfonctionnelle.

Les stations Ivrognes et Pompe étaient alimentées jusqu'en juillet 2024 uniquement sur batteries. Afin de limiter le pénible changement de batterie, les stations RFID étaient éteintes dès que les martelières associées étaient fermées. Ceci explique pourquoi d'importantes périodes de dysfonctionnement sont indiquées pour ces deux stations (Figure A83).

Pour l'étude de la dynamique d'échappement, uniquement les détections RFID des stations Fume-Aval, GC-Amont et GC-Aval ont été utilisées, à partir de mai 2022 (Figure A83). La station Fume_Amont est intéressante pour étudier le temps de déplacement entre l'amont et l'aval, obtenir des recaptures au fil du temps et avoir une information pour estimer des taux de survie. Mais elle n'est pas placée à la sortie d'un système. Avant mai 2022, les dysfonctionnements à la station Fume-Aval étaient trop réguliers. Et le suivi de l'échappement aux stations Ivrognes et Pompe a été quasiment en continu uniquement sur une seule saison d'échappement (2022-2023).

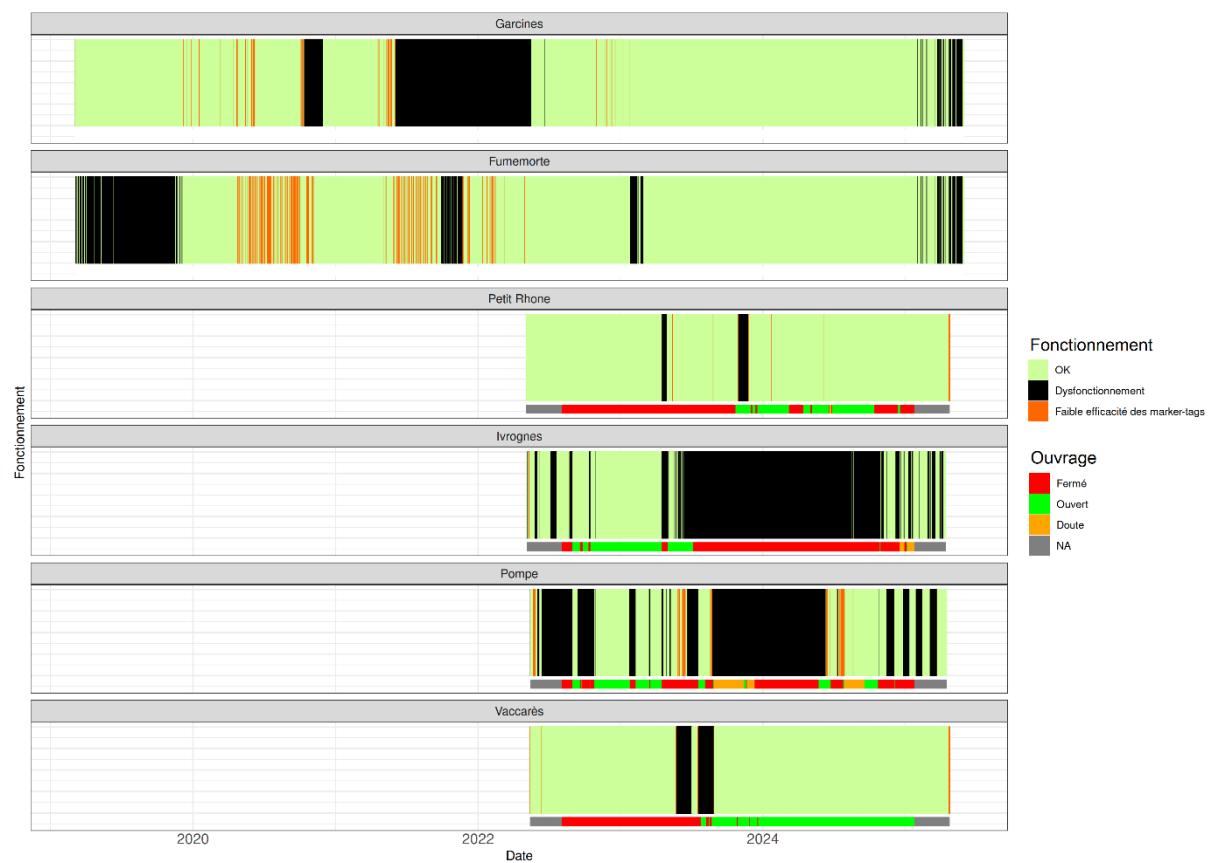


Figure A83 : Evaluation du fonctionnement des stations d'écoute RFID fixes au cours du temps et manipulation des ouvrages de connexion localisés à proximité.

Annexe 12 - Probabilité de détection des anguilles marquées par station RFID

La probabilité de détection d'une anguille par une antenne RFID dépend d'un grand nombre de facteurs tels que l'orientation et le positionnement dans la colonne d'eau d'un individu au moment de son passage, de la portée de détection des antennes, ou d'éventuelles interférences avec des éléments métalliques (Horton et al. 2007). Afin d'étudier la dynamique d'échappement par télémétrie RFID, il est nécessaire d'estimer pour chacune des stations d'écoute, une probabilité de détection des anguilles marquées. Deux méthodes différentes ont été appliquées selon si les stations sont équipées d'un seul ou de deux rideaux d'antennes (Figure A84).

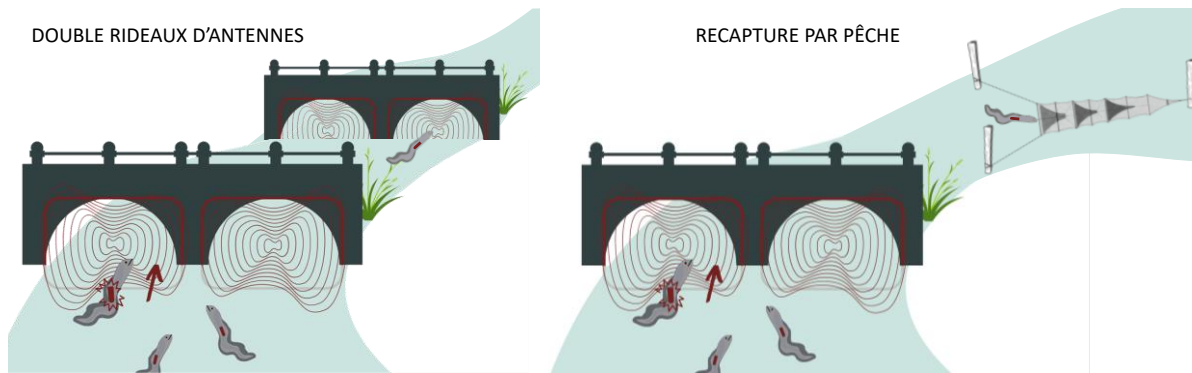


Figure A84 : Illustration des deux méthodes utilisées pour calculer une probabilité de détection des stations d'écoute RFID, selon la présence d'un seul (à droite) ou de deux rideaux d'antennes (à gauche).

Estimation de la probabilité de détection pour les stations avec un double rideau d'antennes

Pour les stations RFID équipées d'un double rideau d'antennes, une estimation de la probabilité de détection des anguilles par rideau d'antennes a été calculée. Ce fut le cas pour la station de Fume-Amont (constituée de 2 x 2 antennes, Figure A84), et pour les stations GC-Amont (Figure A75) et GC-Aval (1 x 2 antennes, Figure A78).

De précédentes études estimaient la probabilité de détection d'une anguille en connaissant le nombre d'individus relâchés en amont du rideau d'antennes (Bass et al. 2012). Dans notre étude, sachant que les deux rideaux d'antennes sont proches l'un de l'autre (<5m), nous supposons que si un individu est détecté par un rideau d'antenne, alors il est obligatoirement passé à travers l'autre rideau d'antennes. Ainsi, le pool d'individus utilisé pour estimer la probabilité de détection au niveau du rideau aval correspond au nombre d'individus détectés au rideau amont, et inversement.

Les estimations de probabilité de détection sont calculées par mois et par rideau d'antennes, avec le modèle bayésien :

$$N_i \sim B(p_i, n_{tot,i})$$
$$p_i \sim U(0,1)$$

Où i correspond au pas de temps mensuel et
 p_i la probabilité de détection des anguilles au temps i .

Dans le cas de l'estimation de probabilité de détection au rideau aval, $n_{tot,i}$ est le nombre total d'anguilles détectées au rideau amont au temps i et N_i est le nombre d'individus détectés au rideau amont et du rideau aval. Dans le cas du rideau amont, $n_{tot,i}$ est le nombre total d'anguilles détectées au rideau aval au temps i et N_i est le nombre d'individus détectés au rideau amont et au rideau aval.

Ces analyses ont été réalisées en utilisant tous les individus marqués, quel que soit leur stade de vie. Des résultats similaires ont été obtenus en utilisant uniquement les individus marqués au stade argenté. Cependant, dans ce dernier cas, il y a moins de données ainsi les résultats présentés sont ceux avec l'ensemble des individus marqués.

La méthode est basée sur le maximum de vraisemblance qui vise à trouver les paramètres qui maximisent la probabilité d'obtenir les données observées. La méthode de Monte Carlo à chaîne de Markov (MCMC) utilisant un échantillonneur Metropolis-Hastings a été mise en œuvre pour estimer les paramètres (Gimenez et al. 2007). Les analyses ont été effectuées avec la version 4.5.1 de R (R Core Team, 2018). Les modèles ont été construits à l'aide du package *nimble* version 1.3.0 (de Valpine et al. 2017). Les modèles ont été exécutés avec deux chaînes afin d'enregistrer 100 000 itérations par chaîne avec un intervalle d'éclaircissement de 5 itérations, après une période de rodage de 10 000 itérations.

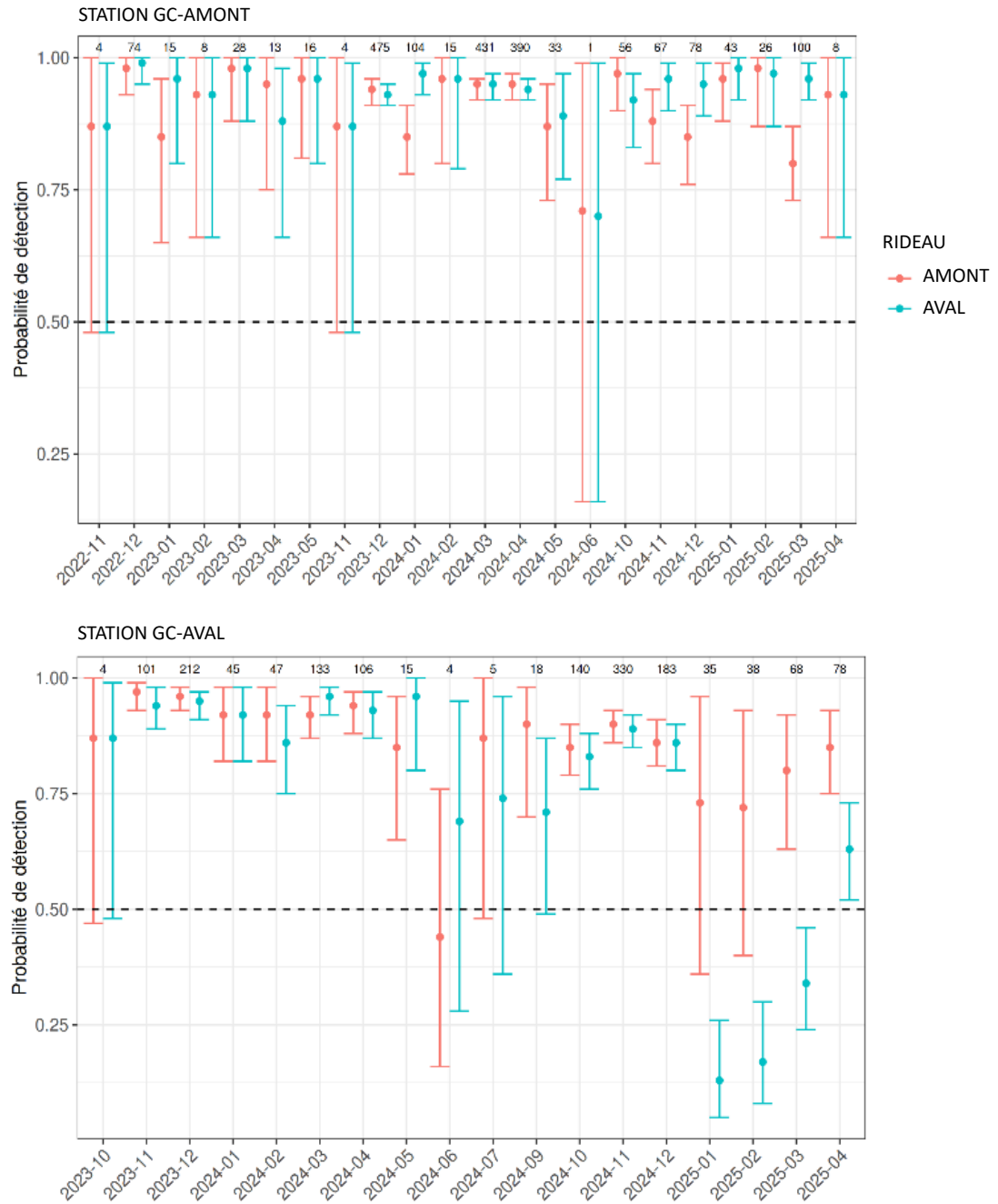
Afin de vérifier la convergence des modèles, plusieurs critères ont été étudiés soit de manière graphique tel que la convergence des chaînes, soit de manière quantitative tels que la taille effective de l'échantillon et le R-hat. Ce dernier compare les estimations entre chaînes et au sein des chaînes et il doit être inférieur à 1.1 (Gelman and Rubin 1992, Vehtari et al. 2021).

Un prior faiblement informatif a été utilisé pour la probabilité de détection en s'assurant que la distribution *a priori* était actualisée par les données observées (van de Schoot et al. 2021).

Résultats

La probabilité moyenne de détection des anguilles des stations RFID GC-Amont et GC-Aval est de 0.97 et de 0.87, respectivement. Ces probabilités étaient similaires au sein de chaque station, entre les rideaux amont et aval, excepté en 2025 à GC-Aval, où des variations entre l'antenne amont et aval ont été observées (Figure A85). Les intervalles de crédibilité sont plus élevés quand peu d'individus étaient détectés. Ces résultats ont montré que ces stations RFID parviennent à détecter généralement 90% des anguilles qui sont passées au travers des antennes. Ce taux est proche de 100% lorsqu'on s'est focalisé uniquement sur les anguilles argentées.

Les probabilités de détection des anguilles à Fume-Amont ont été variables entre les rideaux amont et aval (Figure A85). Au vu de ces résultats et des échanges avec Scimabio Interface, la station Fume-Amont doit être considéré comme un seul rideau.



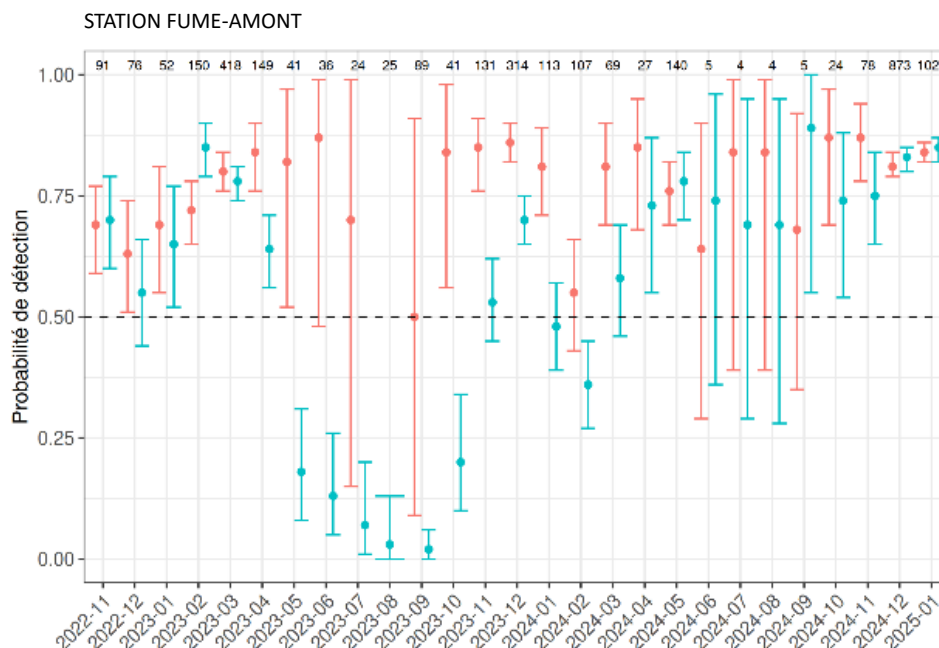


Figure A85 : Probabilité de détection des anguilles et intervalle de crédibilité à 95% par station RFID en fonction du rideau (amont ou aval) au cours du temps. Le nombre total d'individus détectés est indiqué en noir.

Estimation de la probabilité de détection d'une station RFID à partir des recaptures par pêche

Dans le cas de la station RFID Fume-Aval, un filet de pêche a été positionné en aval de la station (à moins de 40 m, filet BAS, Figure 9). Ce filet est orienté en direction de l'amont du canal, de manière à pêcher les individus se déplaçant dans le sens Fumemorte-Vaccarès, ce qui devrait limiter la capture d'individus provenant de l'étang du Vaccarès. La probabilité de détection des anguilles par cette station a ainsi été estimée en supposant qu'une anguille capturée dans le filet de pêche était passée en travers de la station Fume-Aval, et aurait donc dû être détectée. La même méthode que celle pour les stations RFID avec un double rideau a été appliquée, à la différence que les détections du rideau aval ont été remplacées par les captures au filet de pêche.

Comparé à un second rideau, le filet était en place de manière ponctuelle. L'analyse a donc été réalisée uniquement aux périodes de mise en place du filet, c'est-à-dire uniquement 27 occasions. Afin de limiter les décalages de détection entre le passage à la station RFID et la capture au filet, les données ont été agrégées à la semaine. Lorsqu'un individu marqué était capturé dans le filet, il était vérifié si cet individu avait été détecté à la station RFID dans l'intervalle de 7 jours avant sa capture au filet.

Résultats

Les résultats ont montré que la détection moyenne des anguilles à la station RFID est de 0.07 (IC95% : [0.05,0.1]) depuis novembre 2019, et de 0.44 depuis mai 2022 (IC95% : [0.26,0.64]). Les intervalles de crédibilité sont importants à cause de la faible quantité de données provenant du faible nombre de pose du filet positionné à l'aval de la station et du faible nombre d'individus marqués et capturés dans ce filet.

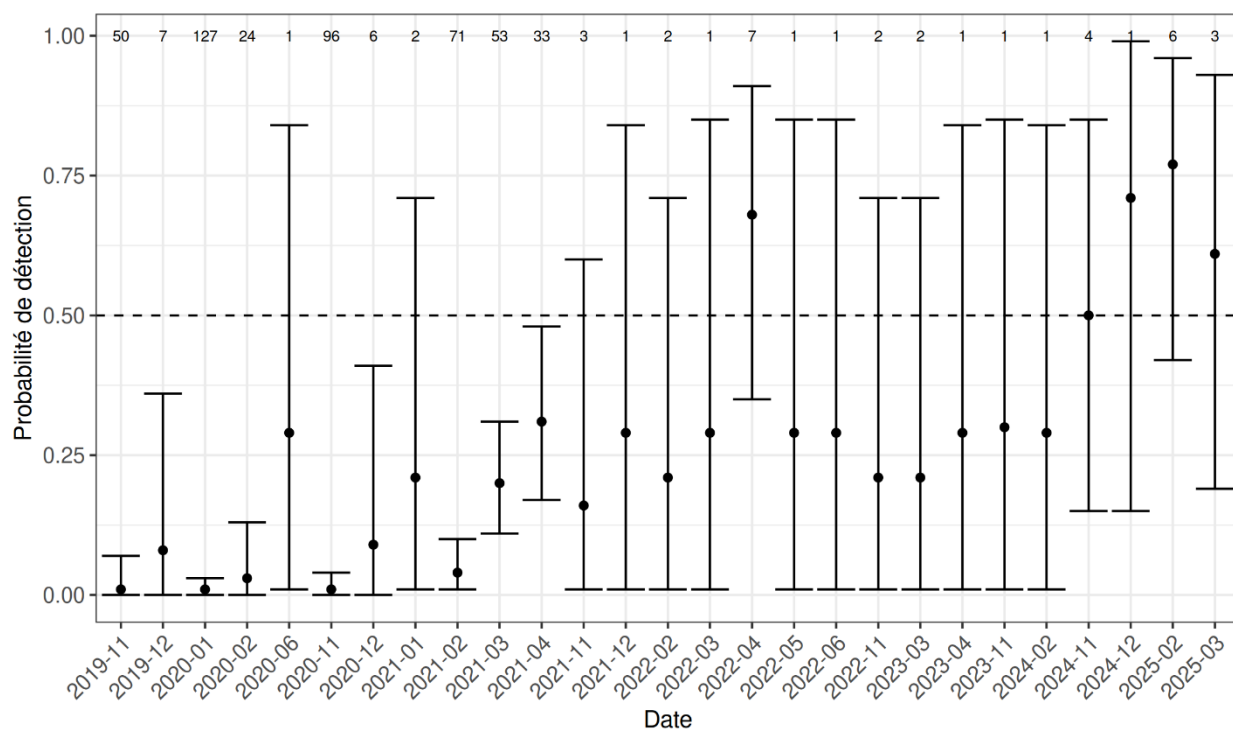


Figure A86 : Probabilité de détection des anguilles et intervalle de crédibilité à 95% à la station Fume-Aval au cours du temps.
Le nombre total d'individus détectés au filet est indiqué en noir.

Annexe 13 – Modélisation bayésienne des périodes d'échappement et de l'influence des paramètres environnementaux

Méthodologie

Choix des données

Données de détection d'anguilles marquées

Afin d'étudier l'échappement des anguilles argentées, l'analyse de données s'est focalisée sur les anguilles marquées et caractérisées comme argentées durant leur dernière biométrie, d'après l'indice Eelrep (Durif et al. 2005). Uniquement la date de première détection de ces individus à une des stations RFID disposées aux sorties du système a été conservée, supposant que ce signal traduit le moment initial où les individus cherchent à s'échapper du système.

Données environnementales

Données météorologiques

Les données météorologiques telles que la température de l'air (°C), la pluviométrie (mm), la vitesse (m/s) et la direction du vent ont été récupérées au niveau de la station météorologique de la Tour du Valat (Météo France) durant la période du suivi (2010-2025). La vitesse et la durée de vent par secteur sont également fournies par heure. A partir de ces deux variables, la distance parcourue par secteur de vent et par heure est calculée :

$$\text{Distance (km)} = \text{Vitesse (km/h)} \times \text{Durée (h)}$$

Ces distances parcourues ont été calculées pour les directions principales qui sont N-O, N-E, S-E et S-O. Par exemple, la distance du vent Nord-Ouest correspond aux vents dont la direction est comprise entre 270° et 0°. Ce découpage en fonction de la direction est représentatif des vents caractéristiques de notre site d'étude (Figure A49).

Phase lunaire

Les informations sur la phase lunaire sont extraites à partir de la date grâce à la fonction `lunar.phase` du package *lunar* (version 0.2-1) ("Lunar Phase" 2014).

Données CTD

A proximité de chaque station RFID, une sonde multiparamétrique (CTD) a été installée pour mesurer en continu la température de l'eau (°C), le niveau d'eau (m) ainsi que la conductivité (mS/cm, Figure A87).

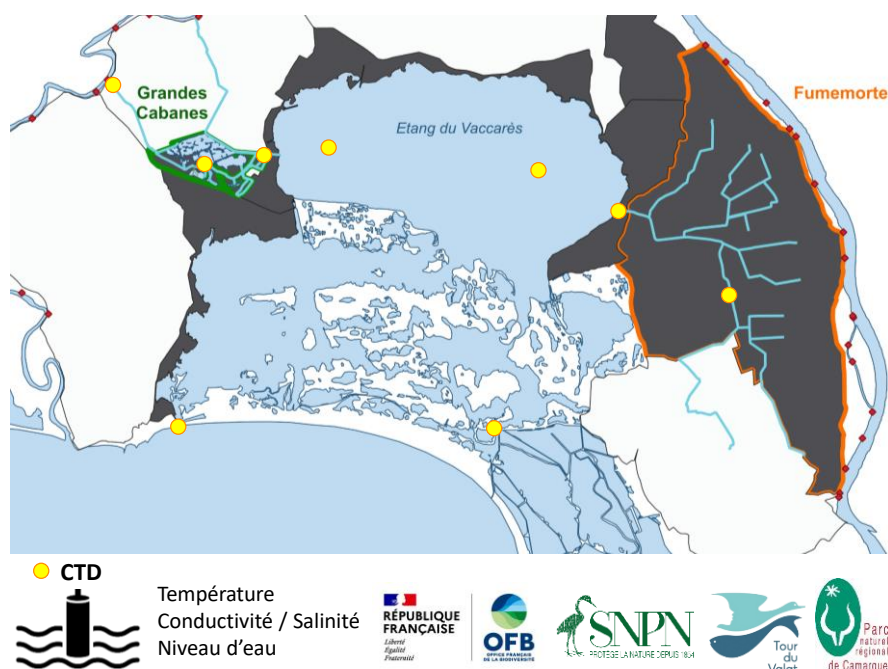
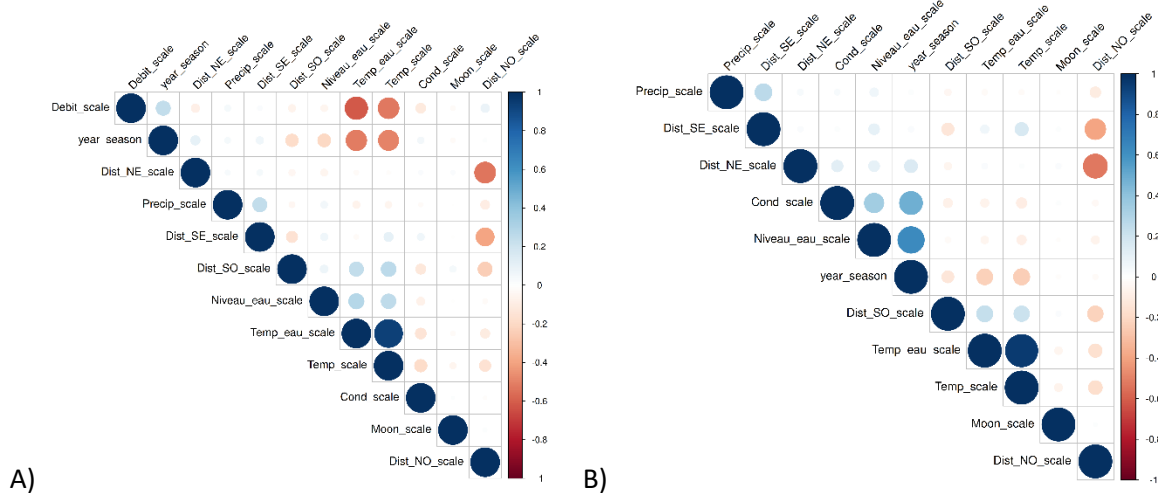
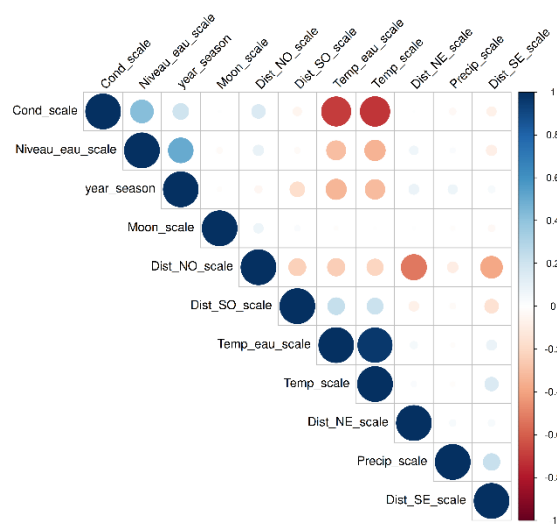


Figure A87 : Localisation des sondes multiparamétriques et logo des structures en charge des suivis environnementaux

Pour chaque site étudié, une analyse multidimensionnelle (ACP) et des tests de corrélation (Test de Pearson, coefficient de corrélation < 0.61 , Figure A88) ont été réalisés afin de présélectionner les variables environnementales les plus représentatives et les plus pertinentes au regard de la littérature sur la dynamique de dévalaison des anguilles (e.g., Reckordt et al. 2014, Monteiro et al. 2020, Teichert et al. 2020, Ciccotti and Morello 2023, Le Gallou et al. 2025).





C)

Figure A88 : Matrice de corrélation des variables environnementales centrées-réduites pour chaque site étudié A) dans le cas de GC Amont, B) GC Aval et C) Fume Aval

Formatage des données

L'activité de l'anguille est principalement nocturne (Figure A89). Les données ont été résumées en journalier de manière à inclure la nuit dans la même journée, c'est-à-dire que la journée t débute à 8h du matin et se termine à 7h59 le jour $t+1$.

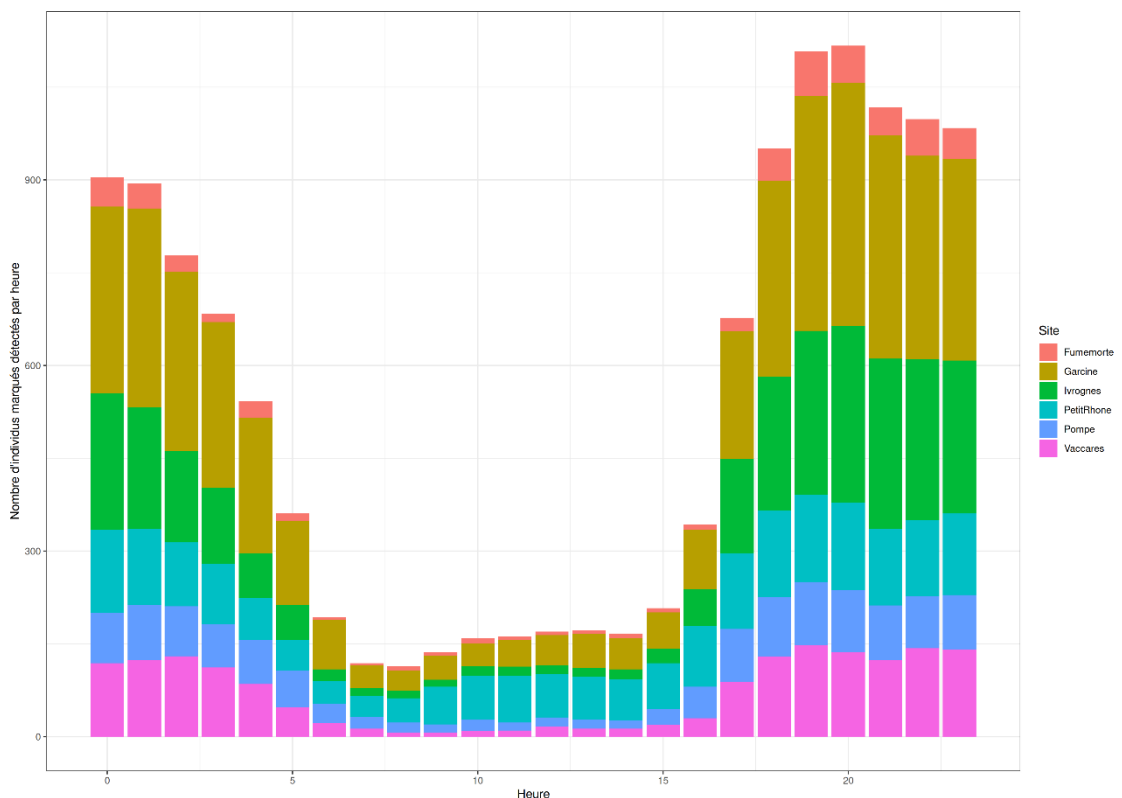


Figure A89 : Nombre d'individus détectés par heure et par station RFID

Modélisation des données

Choix du modèle

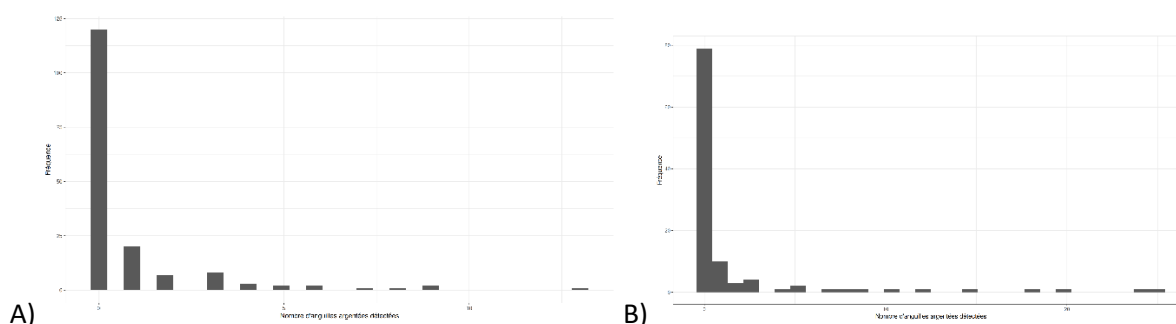
Un modèle linéaire généralisé a été réalisé pour chaque station RFID, afin d'identifier (i) la période d'échappement des anguilles argentées de manière inter- et intra-annuelle et (ii) les facteurs

environnementaux influençant cet échappement. Pour chaque station RFID, le nombre d'anguilles argentées détectées pour la première fois à cette station a été utilisé comme variable réponse dans le modèle. Ces données sont constituées d'un nombre non négligeable de 0 (68% pour les données provenant de la station GC-Amont, 72% pour celles de la station GC-Aval et 87% pour Fume-Aval). Pour les deux stations des Grandes cabanes, sachant que les probabilités de détections ont été obtenues élevées (proche de 1, Annexe 12), les « 0 » du jeu de données ont été considérés comme un « zéro biologique », c'est-à-dire qu'aucune anguille a été détectée ce jour-là. La même hypothèse a été appliquée pour la station Fume_Aval, malgré une probabilité de détection bien plus faible (Annexe 12). Du fait de la structuration des données (c.-à-d., des données de comptage avec un nombre important de zéros), deux lois de distributions ont été envisagées :

- La loi de Poisson avec du zéro enflée (ZIP) combine à la fois une loi binomiale (pour gérer la présence/absence des anguilles) et une loi de poisson (gérant le nombre d'anguilles détectées). Ainsi, la loi ZIP modélise explicitement deux processus distincts. L'excès de zéros provient soit des zéros dits « structurels » (c.-à-d., une impossibilité biologique ou structurelle de détecter l'individu avec une probabilité (π)) soit des zéros dits « stochastiques » (c.-à-d, cela dépend de la variabilité aléatoire de détection par rapport à la présence avec une probabilité ($1 - \pi$) d'être dans ce cas et un paramètre (λ) définissant le processus de Poisson).
- La loi Négative-Binomiale est une alternative à la loi de Poisson permettant d'ajouter un paramètre afin de gérer la sur-dispersion des données. Comparée à la loi ZIP, la loi négative-binomiale ne modélise pas explicitement deux processus distincts. Elle permet de décrire une expérience composée d'une succession de tirages indépendants (les occasions de détection à chaque station RFID) donnant un « succès » (détection d'un individu) avec une probabilité (μ) et un « échec » (pas de détection d'individu) avec une probabilité complémentaire ($1 - \mu$). Cette expérience se poursuit jusqu'à un nombre n de succès (où n représente donc le nombre d'anguilles détectées à la date t). Le paramètre k représente le nombre d'essais nécessaires pour obtenir le nombre n de succès.

Pour vérifier la validité de chaque modèle, plusieurs critères ont été étudiés (voir *Inférence bayésienne et vérifications*). Ensuite pour comparer les modèles entre eux et sélectionner le modèle représentant au mieux les données de cette étude, deux critères ont été utilisés : celui du LOO IC et du WAIC (voir *Inférence bayésienne et vérifications*).

Afin de simplifier les explications, uniquement l'écriture et les résultats du modèle sélectionné sont présentés. Chaque modèle a été réalisé pour chaque site étudié de manière indépendante.



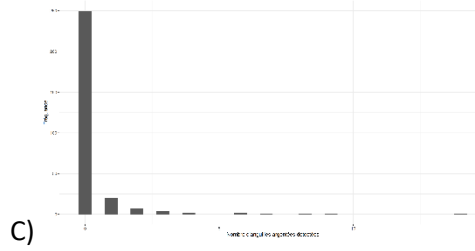


Figure A90 : Histogramme du nombre d'individus détectés par jour (uniquement les premières détections) pour chaque site étudié A) dans le cas de GC Amont, B) GC Aval et C) Fume Aval

Détermination de la période d'échappement

Les variables explicatives 'année de suivi' (définie de septembre de l'année t à août de l'année $t+1$) et 'mois' ont été considérés comme des effets fixes. Le modèle utilisant une loi négative-binomiale s'écrit :

$$\log(\mu_i) = \alpha + \varepsilon_{an,i} + \varepsilon_{mois,i}$$

$$Eff_i \sim NB(p_i, r) \text{ où } r = 1/\varphi \text{ et } p_i = 1/(1 + \varphi * \mu_i)$$

$\varphi \sim U(0,10)$, $\alpha \sim N(0, sd = 5)$, $\varepsilon_{an,i} \sim N(0, sd = 2)$, $\varepsilon_{mois,i} \sim N(0, sd = 2)$ où i correspond au nombre d'occasions (c-à-d, tous les jours de fonctionnement de la station RFID étudiée).

Influence des facteurs environnementaux sur l'échappement

La corrélation entre les variables environnementales a été vérifiée à l'aide d'un test de Pearson. Dans le cas où plusieurs variables étaient corrélées entre elles, une seule variable (celle qui était considérée la plus pertinente dans le contexte de l'étude et de la littérature) a été sélectionnée pour être testée dans les modèles.

Afin d'étudier l'influence des facteurs environnementaux sur le nombre d'anguilles argentées qui s'échappent, un premier modèle a été réalisé en incluant les variables météorologiques et la phase lunaire. Ce modèle permet de considérer l'ensemble des détections RFID acquises (du 1^{er} septembre 2022 au 29 mai 2025). Dans un second modèle, les données de la sonde CTD localisée à proximité de la station RFID ciblée (Figure A87) ont été incluses. Dans ce cas, un nombre plus restreint de données de détection ont été modélisées, du fait d'une plus faible disponibilité des données environnementales, et cela pour les 3 stations RFID. Afin de limiter le nombre de variables, uniquement les variables météorologiques ayant été identifiées avec un effet non nul sur l'échappement des anguilles dans le premier modèle ont été sélectionnées dans ce deuxième modèle. Si la température de l'air est sélectionnée dans le premier modèle, elle est remplacée par la température de l'eau dans le deuxième modèle. Dans ces deux modèles, les données environnementales sont centrées et réduites avant d'être incluses dans le modèle.

Le modèle basé sur une distribution négative-binomiale incluant les variables météorologiques et la phase lunaire s'écrit :

$$\log(\mu_i) = \alpha + \varepsilon_{an,i} + \beta_{temp} * Temp_i + \beta_{precip} * Precip_i + \beta_{lune} * Lune_i + \beta_{vent_NO} * Vent_NO_i + \beta_{vent_NE} * Vent_NE_i + \beta_{vent_SE} * Vent_SE_i + \beta_{vent_SO} * Vent_SO_i$$

$$Eff_i \sim NB(p_i, r) \text{ où } r = 1/\varphi \text{ et } p_i = 1/(1 + \varphi * \mu_i)$$

$\varphi \sim U(0,10)$, $\alpha \sim N(0, sd = 5)$, $\varepsilon_{an,i} \sim N(0, sd = 2)$, $\beta_X \sim N(0, sd = 5)$ où X correspond aux variables environnementales centrées-réduites testées (par ex., $X = Temp$ dans le cas de la température) et i au nombre d'occasions (c-à-d, tous les jours de fonctionnement de la station RFID étudiée).

Le second modèle se base sur la même écriture que le modèle précédent.

Inférence bayésienne et vérifications

La méthode est basée sur le maximum de vraisemblance qui vise à trouver les paramètres qui maximisent la probabilité d'observer les données. La méthode de Monte Carlo à chaîne de Markov (MCMC) utilisant un échantillonneur Metropolis-Hastings a été mise en œuvre pour estimer les paramètres (Gimenez et al. 2007). Les analyses ont été effectuées avec la version 4.5.1 de R (R Core Team 2018). Les modèles ont été construits à l'aide du package *nimble* version 1.3.0 (de Valpine et al. 2017). Les modèles ont été exécutés avec quatre chaînes afin d'enregistrer 450 000 itérations par chaîne avec un intervalle d'éclaircissement de 10 itérations, après une période de rodage de 20 000 itérations.

Afin de vérifier la convergence des modèles, plusieurs critères ont été étudiés soit de manière graphique tel que la convergence des chaînes, soit de manière quantitative tels que l'autocorrélation des estimations des paramètres, la taille effective de l'échantillon et le R-hat. Ce dernier compare les estimations entre chaînes et au sein des chaînes et il doit être inférieur à 1.1 (Gelman and Rubin 1992, Vehtari et al. 2021).

Des priors semi-informatifs ou faiblement informatifs ont été utilisés pour les différents paramètres après s'être assuré que les distributions *a priori* sont actualisées par les données observées (van de Schoot et al. 2021).

A posteriori, l'adéquation entre le modèle et les données disponibles a été évaluée (Gelman et al. 2013). Pour cela, l'approche de réplication des données est utilisée. La distribution des statistiques sommaires sur des ensembles de données répliqués est comparée *a posteriori* avec les valeurs obtenues à partir des données observées (Gelman et al. 2013).

La sélection du meilleur modèle en fonction de la loi de distribution (c.-à-d., une loi de Poisson zéro enflée ou une négative-binomiale) est effectuée tout d'abord en comparant les critères précédemment énoncés afin d'éliminer les modèles qui ne convergeaient pas correctement. Si les modèles convergeaient correctement alors la sélection a été réalisée sur la base de deux critères. 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. Le critère d'information largement applicable (WAIC) sert à estimer l'erreur de prédiction hors échantillon attendue à l'aide d'un ajustement corrigé du biais de l'erreur intra-échantillon et de la distribution *a posteriori* (Watanabe 2010, 2021, Gelman et al. 2014). Le modèle sélectionné était celui ayant la plus faible valeur du LOO IC et du WAIC (Gelman et al. 2014).

Graphiques exploratoires relatifs aux détections d'individus marqués

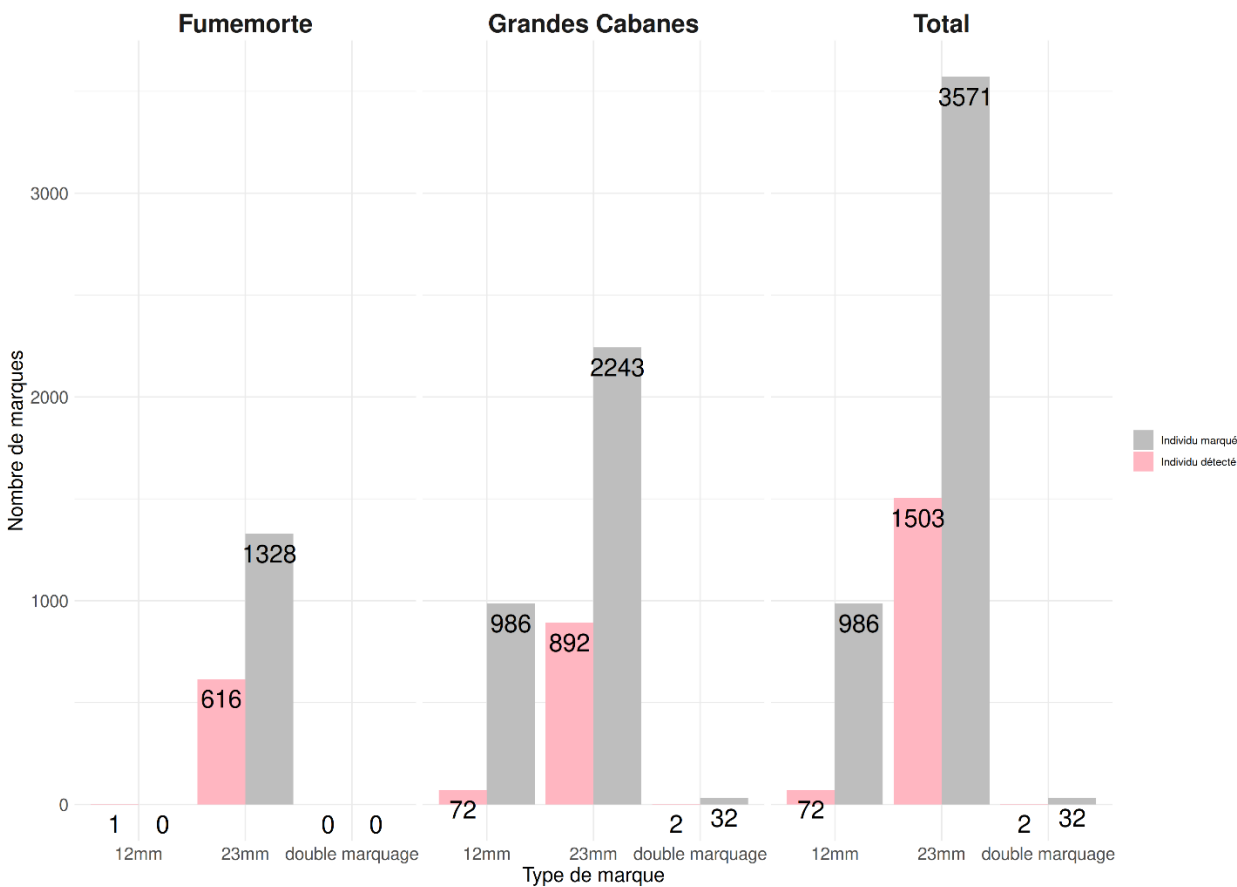


Figure A91 : Nombre d'individus marqués et nombre d'individus marqués et détectés en fonction du type de marquage (12 mm et/ou 23 mm, uniquement avec les marques compatibles avec la technologie RFID) et du site d'études, en considérant toutes les données existantes.

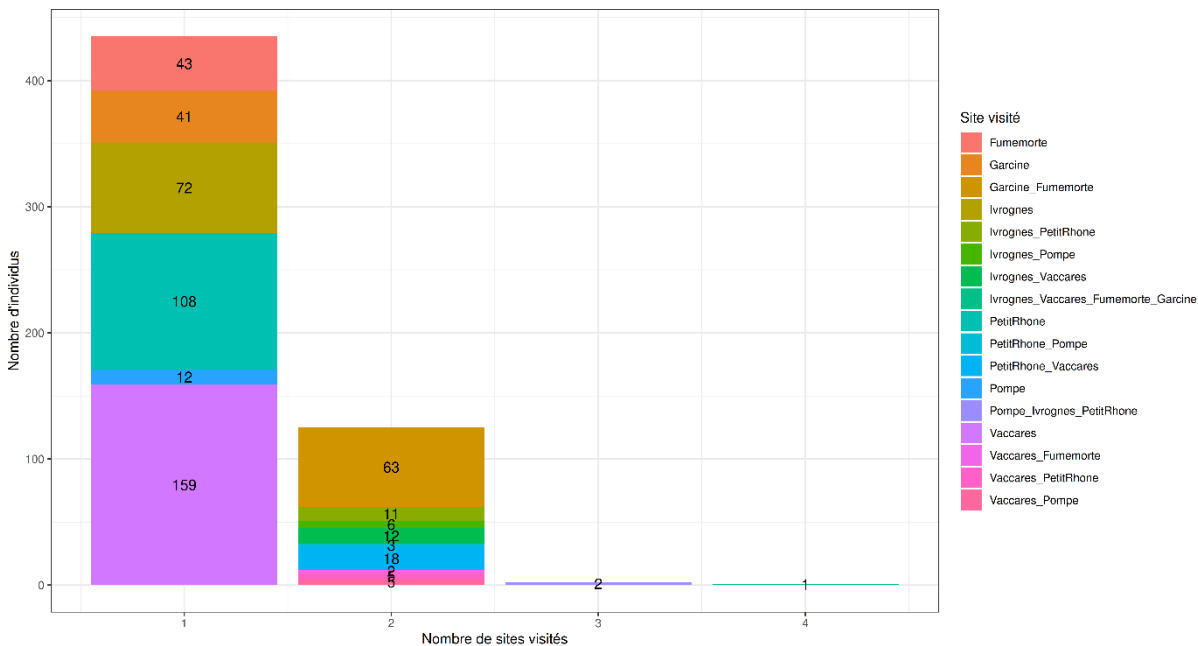


Figure A92 : Nombre d'individus argentés marqués en fonction du nombre de stations RFID visitées depuis la saison 2022-2023. Les couleurs correspondent aux stations RFID visitées.

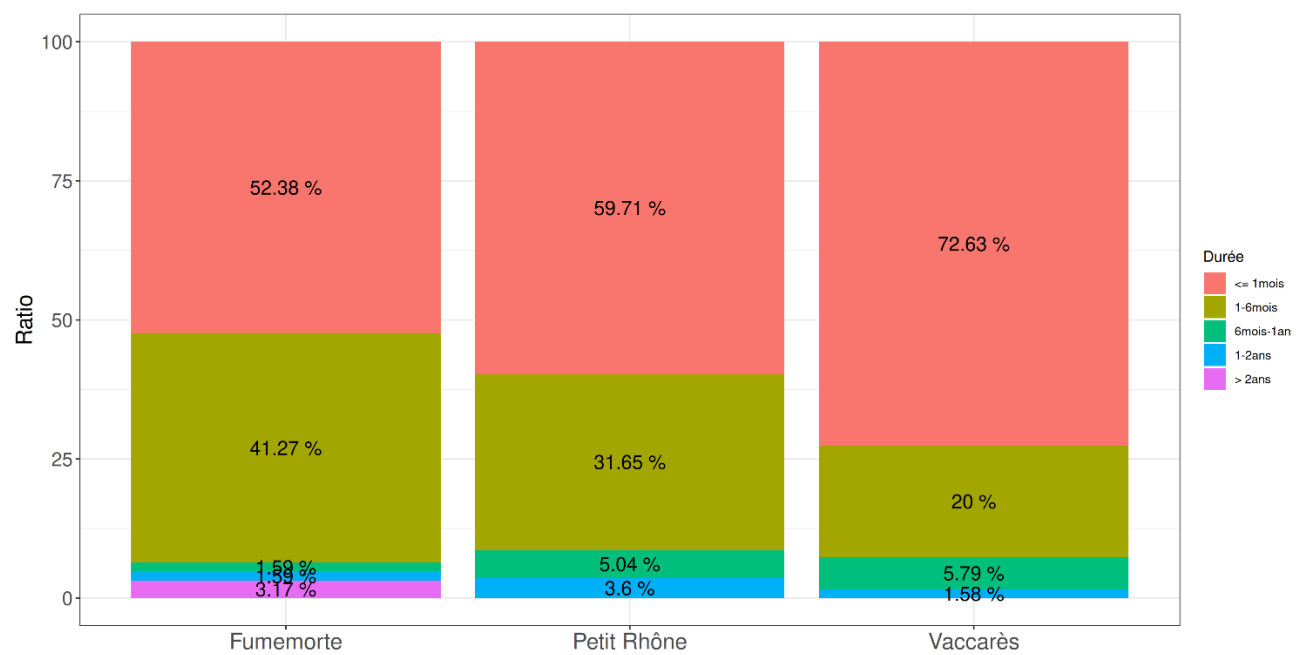


Figure A93 : Pourcentage des individus détectés en fonction de la durée entre leur dernière biométrie (capture) et leur première détection à une des 3 stations d'écoute RFID à partir de la saison 2022-2023.

Annexe 14 – Tracking actif RFID

Un total de quatre boîtiers RFID ont été acquis, deux en 2023 et deux autres en 2024, afin de pouvoir réaliser du tracking actif. Ce dispositif permet de chercher à détecter des individus marqués en se déplaçant, à l'aide d'une antenne portative (Figure A94). Deux antennes ont été spécialement conçues pour pouvoir détecter des marques dans un rayon de soit quelques centimètres (~10 cm), soit d'environ 1 mètre. Ce dispositif a été testé dans plusieurs cas de figure :

Détectations au stand de biométrie

L'utilisation du matériel mobile a été utilisé au stand de biométrie pour vérifier si le dispositif détectait bien les individus déjà marqués. Dans plusieurs cas, de faux numéros ont été enregistrés (marques rouges de la Figure A95). Par élucidation, une solution a été trouvée pour retrouver les bons numéros de marque (en soustrayant le nombre 256461087178752).

Suivi en tracking actif dans le milieu

En avril et octobre 2024, quelques campagnes de tracking actifs ont été réalisées aux Grandes Cabanes et sur le canal du Fumemorte. Aux Grandes Cabanes, l'effort s'est focalisé sur le marais de la Tortue et les canaux affiliés. La première campagne en avril 2024 sur le marais de la Tortue a permis de détecter quelques individus marqués (Figure A95). Ce fut la campagne la plus efficace en termes de détections. Très peu d'autres détections aux Grandes Cabanes et aucune sur le canal du Fumemorte ont été obtenues aux autres occasions.



Figure A94 : Tracking actif au marais de la Tortue, avril 2024 © C. Tetrel

En avril 2024, un total de cinq petites marques de 12 mm au niveau de deux zones de relâcher ont été détectés. Ces détections ont confirmé que le marquage en dorsal introduit en avril 2023 a induit une perte de marques sur de plusieurs petits individus. Le placement de la marque en dorsal a donc été ensuite rectifié (plus près de la nageoire principale). Et dorénavant, la semaine qui suit la semaine de pêche aux Grandes Cabanes, un passage au tracking actif est réalisé sur les 4 zones de relâcher pour détecter d'éventuelles pertes de marques additionnelles.



Figure A95 : Circuit réalisé en partegue (barque à fond plat) dans le marais de la tortue le 8 avril 2024 pour suivre activement des éventuelles anguilles marquées. Les points jaunes correspondent à des marques de 12 mm, les points rouges et bleus à des marques de 23 mm.

Détections de recaptures par la pêche professionnelle

La mise en place d'un suivi des recaptures RFID chez les deux pêcheurs professionnels travaillant à proximité des embouchures des Grandes Cabanes et du canal du Fumemorte dans l'étang du Vaccarès était un des objectifs du projet COLAGANG. En collaboration avec le pôle écohydraulique de l'OFB de Toulouse et Scimabio Interface, une réflexion et des tests ont été réalisés dans le but de mettre en place un dispositif qui soit le moins contraignant possible pour les pêcheurs. Finalement, la solution qui s'est avérée la plus efficace et fiable était qu'une personne scientifique se déplace systématiquement, au moins une fois par semaine, idéalement au moment du passage du mareyeur, pour passer les captures du pêcheur au tracking actif. Ce suivi impliquait donc une disponibilité et un temps de personnel qui n'avait pas été anticipé, puisqu'il était question en premier lieu de concevoir un système qui fonctionne en autonomie. Le suivi a néanmoins été mené le plus assidûment de mars à mai et de novembre à décembre 2025, auprès de Michel Bénézech, grâce notamment à l'implication de notre postdoctorante.

Exploration des détections RFID

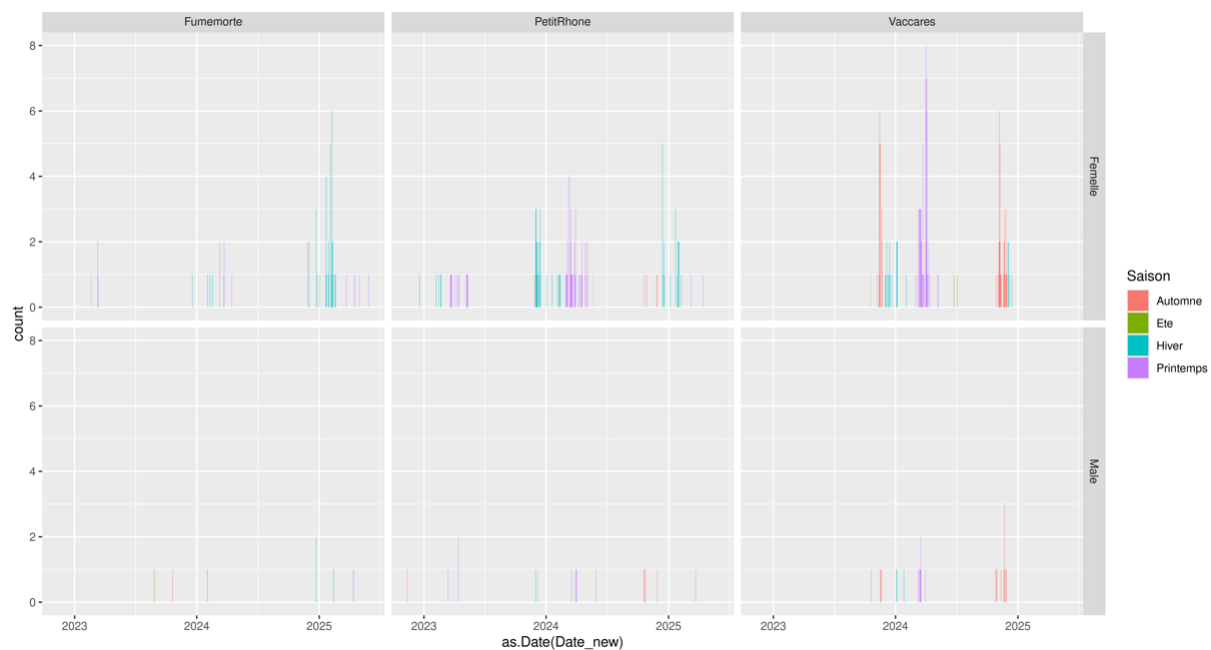


Figure A96 : Détections RFID des anguilles argentées en fonction du sexe au cours du temps à l’embouchure du canal du Fumemorte et aux 2 sorties des Grandes Cabanes (Amont- Petit Rhône et Aval – Vaccarès).

Annexe 15 – Télémétrie RFID ou acoustique ? Avantages & Inconvénients

Chaque type de technologie utilisée pour les suivis en télémétrie présente des avantages et des inconvénients. Ici, tandis que la technologie RFID est sensible aux perturbations électromagnétiques et aux variations des conditions environnementales, la télémétrie acoustique est sensible au bruit (Figure A97). Les antennes RFID fonctionnent davantage en milieu d’eau douce, peu profond, alors que les portées de détections des hydrophones augmentent avec la profondeur. Des suivis en télémétrie acoustique en milieu peu profond (lagunaire) ont néanmoins bien fonctionnés en adaptant la pose des hydrophones (par forcément à la verticale) et en augmentant le nombre d’hydrophones (Richard et al. 2020, Durieux et al. 2025).

Les marques RFID sont peu coûteuses et ont une durée de vie illimitée, ce qui permet de mettre en place des suivis en capture-marquage-recapture sur du long terme et d’équiper un large nombre d’individus pour obtenir un échantillon représentatif de la population. En acoustique, les marques utilisées émettent une série de micro sons à un pas de temps programmé. Ces marques fonctionnent sur batterie et ont donc une durée de vie limitée dans le temps, qui dépend des paramètres de programmation (intensité, fréquence des émissions) et des capteurs intégrés. En effet, il est possible de choisir des marques qui sont équipées avec un capteur (par exemple, sonde de température, capteur de prédation ou accéléromètre). Ces marques sont très coûteuses (de 250 à plus de 500 € selon les fournisseurs), ce qui implique de ne considérer qu’un sous-échantillon des peuplements étudiés. Par ailleurs, l’implantation est plus invasive de par la taille des marques et implique de considérer que les individus suffisamment grands.

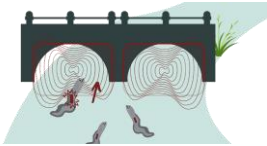



Télémétrie RFID		Télémétrie acoustique	
Principe : 			
Marque utilisée :  <div> 3,85 mm de diamètre 23 mm de long 0,6 g Durée de vie illimitée Coût < 3 € </div>		 <div> 9 mm de diamètre 20-30 mm de long 4,5 g Durée de vie limitée : ↗ signal fort et fréquent ↘ Batterie Coût 250 € - 500 € </div>	
Contraintes : <div> Technologie sensible aux perturbations électromagnétiques et aux variations du milieu (conductivité, vent, température de l’eau, niveau d’eau, etc.) </div>		<div> Technologie sensible aux bruits (brassage de l’eau), à la turbidité. </div>	
Milieu plus adapté : Eau douce, faible profondeur		Profondeur élevée, tous types de salinité	

Figure A97 : Comparaison entre les technologies de télémétrie RFID et acoustique : marques utilisées dans le cadre du projet COLAGANG et contraintes. Illustration C. Lefebvre.

Annexe 16 – Mise d'en place du suivi par télémétrie acoustique

La lagune est un milieu peu profond fortement exposé au vent, ce qui peut engendrer un brassage des masses d'eau et donc du bruit pouvant perturber les capacités des hydrophones à détecter les individus marqués. Par ailleurs, la portée des hydrophones qui est conique et dirigée à la verticale est diminuée avec la faible hauteur d'eau. Afin de remédier à cette contrainte, plusieurs hydrophones doivent être positionnés à proximité les uns des autres pour optimiser la détection du passage d'un individu marqué aux points de passage clés. En janvier et février 2023, plusieurs campagnes ont été réalisées sur les 4 sites (exutoire aval des Grandes Cabanes, embouchure du canal du Fumemorte, pertuis de la Fourcade et pertuis de la Comtesse) à équiper afin de déterminer le nombre d'hydrophones et la distance à laquelle les positionner.

Tests pour la disposition du réseau des hydrophones

En janvier et février 2023, une première série de campagnes a été réalisée sur chacun des sites en positionnant 3 hydrophones (prêtés par l'UMR MARBEC). Un transpondeur test émettant toutes les 10s était lentement traîné sur plusieurs dizaines de mètres à l'aide d'un kayak. Ce kayak était équipé d'un GPS différentiel afin de tracer précisément la position du transpondeur en continu (Figure A98, Figure A99 et Figure A100). Ces transects ont été répétés deux fois en plaçant le transpondeur proche de la surface (~30 cm de fond) et en profondeur (de 1 à 1,5 m selon la hauteur d'eau des sites). Le couplage des données de GPS et des enregistrements des hydrophones a permis d'estimer la portée de détection de chaque hydrophone (Figure A98 et Figure A99). Les tests ont été réalisés avec un transpondeur 'V13' (13 mm de diamètre, prêté par INRAE Aix-en-Provence). Cette marque est plus grande que celles qui ont été utilisées par la suite dans notre suivi (V9). D'après le fournisseur, comme la marque V13 utilisée était ancienne, les portées de détection obtenues devaient être assez équivalentes avec les nouvelles V9 que nous aurons utilisées par la suite. Ces campagnes de test ont été réitérées en janvier 2024 avec une marque test V9 et nous avons en effet retrouvé des portées de détection d'ordre de grandeur équivalentes.

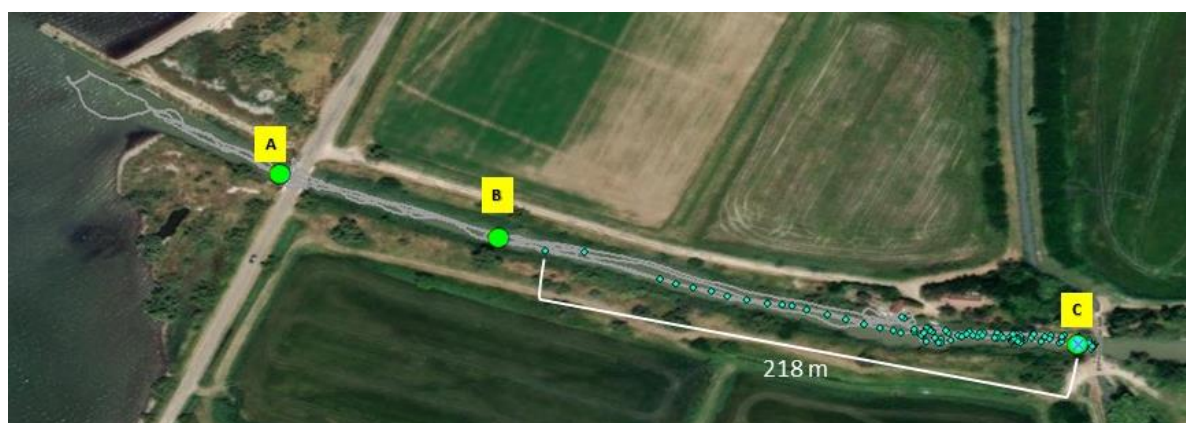


Figure A98. Exemple de transect réalisé en kayak à l'embouchure du canal du Fumemorte. Les gros points verts représentent les 3 hydrophones immergés. Les petits points turquoise correspondent aux détections du transpondeur-test (V13) par l'hydrophone "C", lorsqu'il était placé à 50cm en profondeur.



Figure A99. Exemple de transect réalisé en kayak au pertuis de la Comtesse jusqu'à la connexion entre les étangs du Tampan et du Galabert. Les gros points correspondent aux 3 hydrophones immergés. Les petits points roses représentent les détections de l'hydrophone orange, les bleus de l'hydrophone vert et les oranges de l'hydrophone violet.

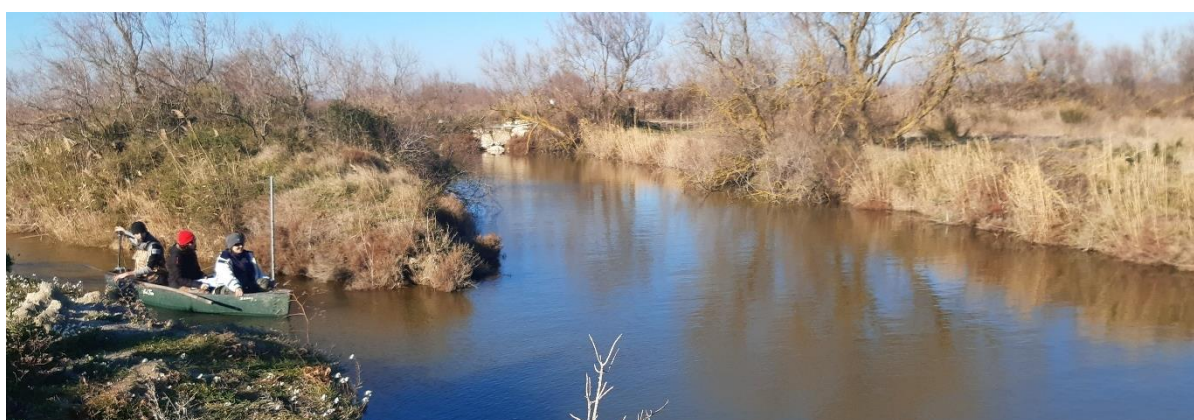


Figure A100. Photographies des sorties kayak pour faire les transects avec à bord un GPS différentiel et un transpondeur placé à une profondeur connue : (en haut) équipe INRAE sur le canal de la Sigoulette (©D. Nicolas), (au milieu) à la confluence entre la reconnexion des Grandes Cabanes et le canal de la Sigoulette dans l'étang du Vaccarès, et (en bas), sur le petit Rhône, en face de la prise d'eau gravitaire des Grandes Cabanes (©C. Tetrel).

Début 2023, la future reconnexion des Grandes Cabanes n'était pas encore restaurée et le canal de reconnexion n'avait donc pas pu être testé. L'installation des hydrophones sur la partie du canal de l'ASA de la Sigoulette que les anguilles des Grandes Cabanes pourraient décider d'emprunter *via* les sorties 'Pompe' ou 'Ivrognes' avaient néanmoins été prospecté (Figure A101).



Figure A101. Test kayak à l'embouchure du bassin des Grandes Cabanes et du canal de la Sigoulette. Les détections par l'hydrophone C sont représentées en fonction de la profondeur de la marque.

De plus, afin d'étudier l'incidence du vent, les 3 hydrophones ont été laissés en place plusieurs jours d'affilés par conditions de grands vents (souvent du mistral, vent de Nord / Nord-Ouest) pour tester les évolutions des portées de détection à chacun des sites (Figure A102 et Figure A103). Tous les 25m environ, un transpondeur (*sync-tag*), émettant toutes les 15 minutes environ, a été fixé sur un piquet à une profondeur connue. Une quinzaine de ces transpondeurs test (V13) nous ont été mis à disposition par INRAE Aix-en-Provence. Ces tests ont montré que le vent peut en effet fortement réduire la portée des détections des hydrophones. D'où l'intérêt de densifier les secteurs ciblés au maximum pour éviter de rater le passage d'une anguille équipée en acoustique (Figure A102 et Figure A103).

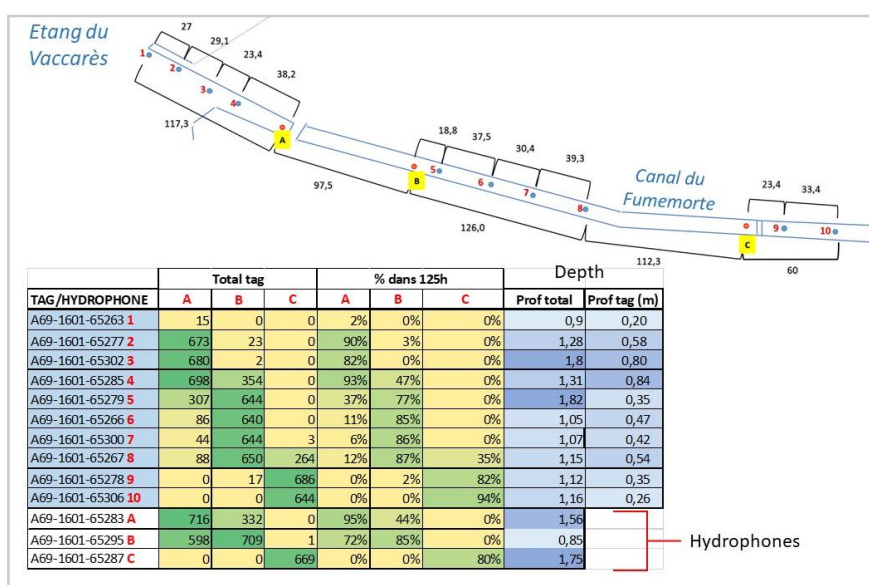


Figure A102. Campagne de test des hydrophones par condition de vent fort au niveau l'embouchure du canal du Fumemorte (25-31 janvier 2023). Les hydrophones sont représentés en jaune avec des lettres majuscules. Les petits points bleus numérotés correspondent à l'emplacement des piquets sur lesquels ont été fixés les transpondeurs-test. Le tableau montre les détections des transpondeurs-test par les 3 hydrophones en nombre et en pourcentage sur la durée d'exposition (125h).

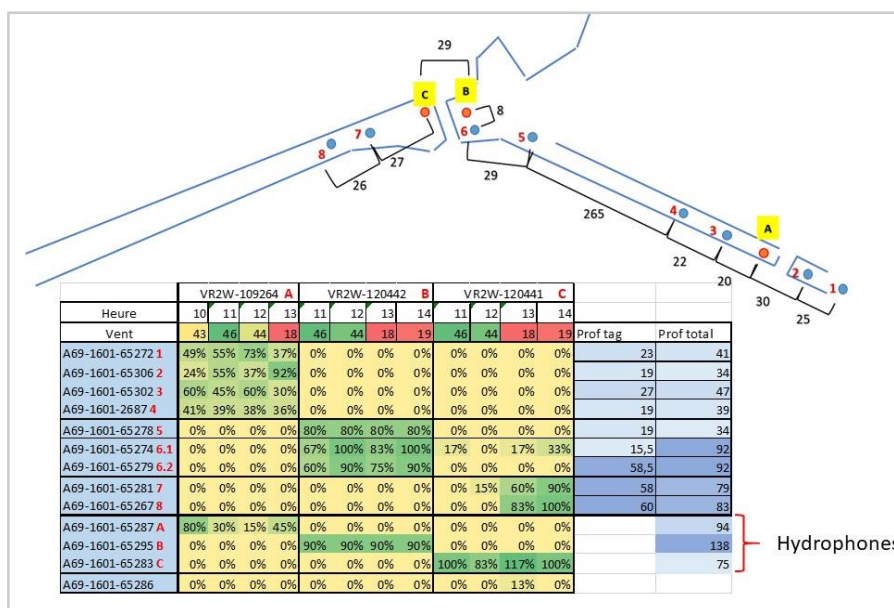


Figure A103. Campagne de test des hydrophones par condition de vent fort au niveau du pertuis de la Fourcade (24 février 2023). Les hydrophones sont représentés en jaune avec des lettres majuscules. Les petits points bleus numérotés correspondent à l'emplacement des piquets sur lesquels ont été fixés les transpondeurs-test. Le tableau montre les pourcentages de détection des transpondeurs-test par les 3 hydrophones et par heure. La vitesse moyenne du vent fournie par Windguru est indiquée. Un transpondeur était placé également au-dessus de chaque hydrophone.

Acquisition du matériel et installation des hydrophones

A partir des résultats de ces campagnes tests, la configuration du réseau et le choix du matériel a été acté et commandé. Afin d'être compatible avec le réseau du projet Connect-Med, piloté par l'UMR MARBEC, c'est du matériel VEMCO, devenu ensuite Innovasea, qui a été choisi. Un total de 16 hydrophones VR2W-69KHz (Figure A104) a été acquis en août 2023, et 3 hydrophones supplémentaires nous ont été gracieusement prêtés par le laboratoire CEFREM/ Perpignan Université. Un total de 80 marques V9-2L qui émettent toutes les 35 s en moyenne ont été achetées. Ces marques ont une durée de batterie d'environ 8 mois, ce qui permet de suivre leurs déplacements au moins pour la période d'octobre à mai. De plus, 9 marques avec un délai d'émission de 30 minutes ont été acquises pour une veille de l'état de fonctionnement du réseau des hydrophones en continu. Enfin, une marque test qui émet toutes les 10 s a été acquise afin de pouvoir faire de nouveaux tests de portée de détection.



Figure A104 : Photographies des hydrophones VEMCO VR2W-69KHz ©R. Ambrosio

Durant l'été 2023, des structures de fixation pour les hydrophones ont été confectionnées de manière à ce que les hydrophones (i) restent discrets dans le milieu, (ii) soient solidement ancrés à la verticale au fond de la colonne d'eau sans être enseveli par la vase, et (iii) puissent être sortis de l'eau sans avoir à relever toute la structure de fixation (Figure A105).

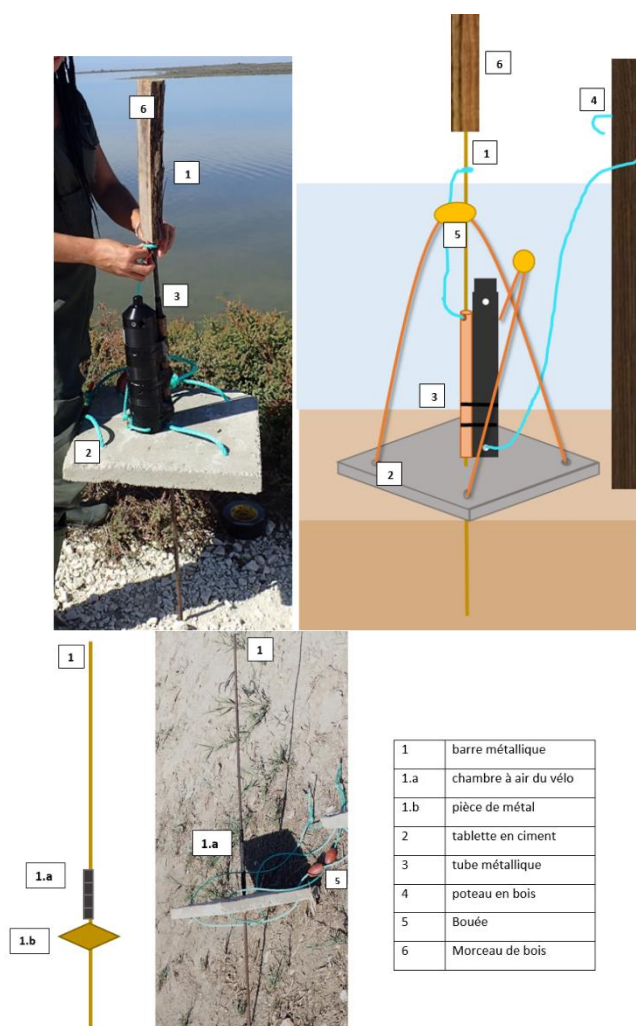


Figure A105. Structure pour la fixation des hydrophones dans le milieu

Le réseau des hydrophones a été installé en octobre 2023 (Figure 24). De novembre 2023 à mai 2024, les hydrophones ont été relevés quasiment une fois par mois afin de télécharger les données, de les nettoyer, et de s'assurer de leur sécurité. Ils ont été ôtés en mai-juin 2024, avant que les niveaux d'eau deviennent trop faibles.

La deuxième année de suivi (2024-2025), les hydrophones ont été à nouveau installés, à partir de septembre 2024. Un hydrophone supplémentaire VR2Tx-69kHz a été acquis et 5 hydrophones supplémentaires ont été prêtés par INRAE Aix-en-Provence, afin de densifier le réseau à l'intérieur des deux bassins ciblés et d'équiper le Petit Rhône avec deux hydrophones. Un total de 41 nouvelles marques a été acquis, dont 40 marques équipées d'un capteur de prédation.

Durant l'hiver 2025, les tests de portée de détection ont été réitérés pour chaque hydrophone afin de vérifier l'efficacité du réseau (Figure A106). Les portées de détection sont très dépendantes de la configuration et de la profondeur des secteurs équipés. A l'aval du Petit Rhône, le tag test placé à une profondeur de 1.5m a été détecté jusqu'à 380m de l'hydrophone. Tandis qu'au niveau du pertuis de la Fourcade, les hydrophones ont une portée de détections de seulement 15 à 35m.

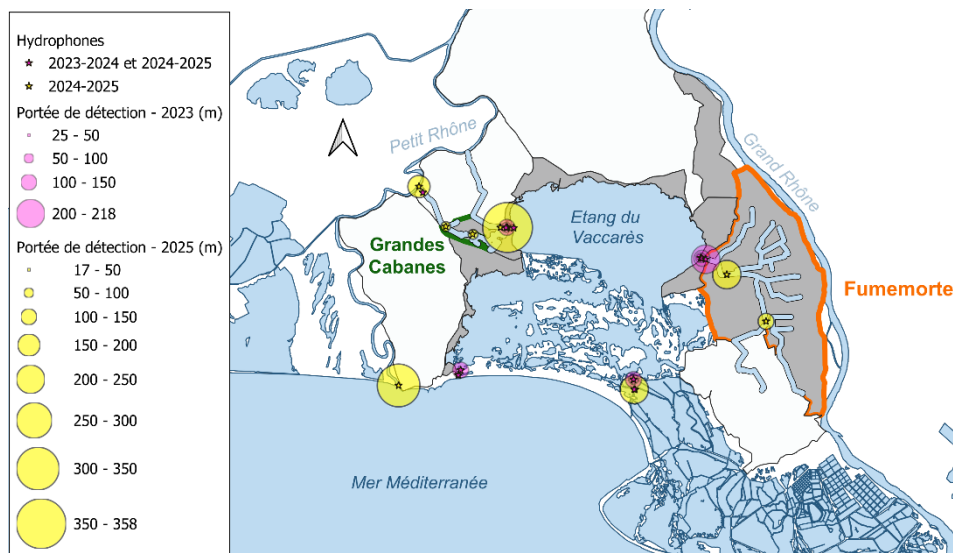


Figure A106 : Carte représentant les portées de détection par hydrophone obtenues lors des campagnes tests réalisées en 2023 (marque V13) et en 2025 (marque V9), pour les tags tests placés en profondeur (1 à 1.5m).

Zoom par secteur sur la localisation des hydrophones

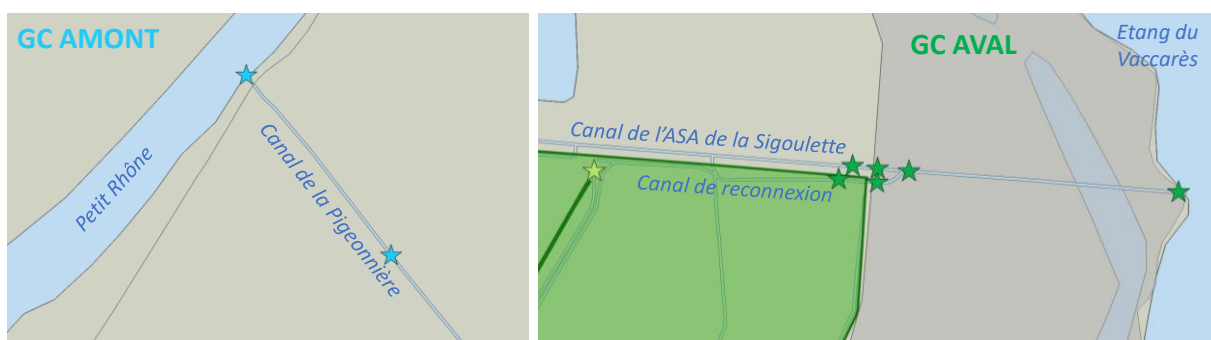


Figure A107 : Zoom sur la localisation des hydrophones aux sorties amont et aval du bassin des Grandes Cabanes



Figure A108 : Zoom sur la localisation des hydrophones à l'embouchure du canal du Fumemorte

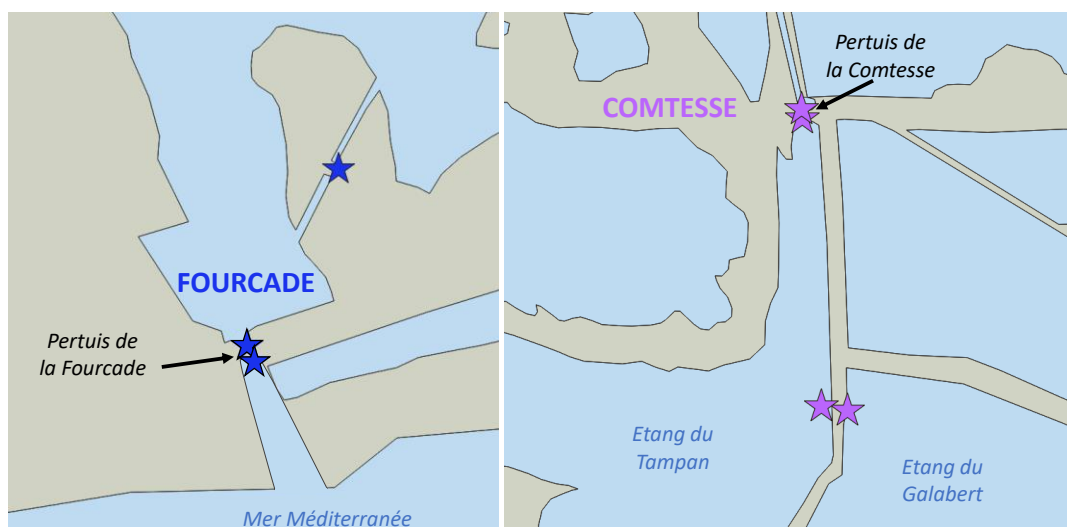


Figure A109 : Zoom sur la localisation des hydrophones au niveau du pertuis de la Fourcade et du pertuis de la Comtesse

Annexe 17 - Marquage acoustique

Un stand de chirurgie, adapté à l'opération de marquage acoustique, qui demande la réalisation de points de suture, a été conçu (Figure A110). Ce stand permet d'irriguer l'individu pendant toute la durée de l'opération avec une solution anesthésiante.

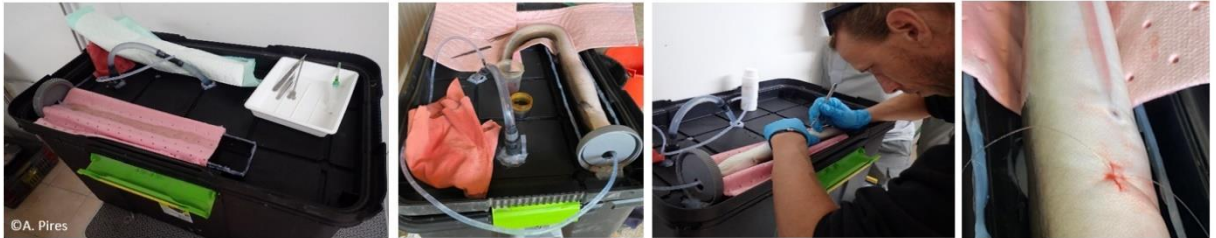


Figure A110. Marquage acoustique d'une anguille avec point de suture

Le marquage est réalisé d'octobre à février au plus tard, afin d'utiliser les marques qui ont une durée de batterie de 8 mois sur une période suffisamment longue et avant l'été (pendant lequel les hydrophones sont ôtés du système). Seules des anguilles femelles argentées migrantes de plus de 60 cm (Figure A111 et Figure A112) ont été triple marquées avec :

- une marque acoustique V9 ;
- une marque RFID, afin de suivre leurs éventuels passages au niveau des stations d'écoute RFID ;
- une marque externe au niveau de la nageoire dorsale avec de la peinture acrylique a été réalisée (Figure A113), afin de donner une chance aux pêcheurs professionnels de reconnaître les anguilles marquées en cas de recapture dans leurs filets.

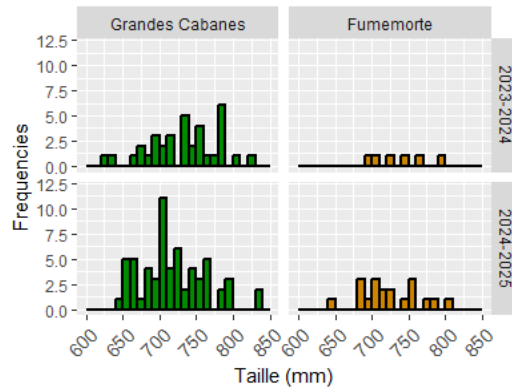


Figure A111 : Spectre de taille des individus marqués en acoustique par bassin et par année de suivi

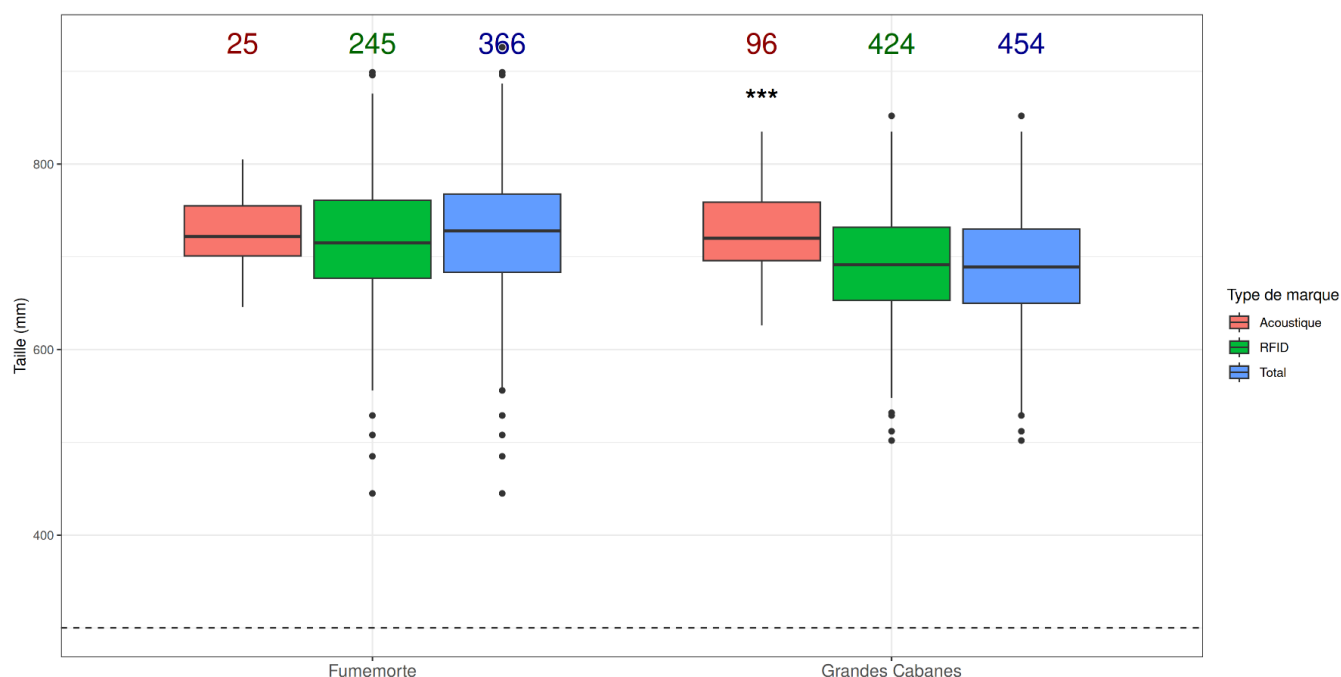


Figure A112 : Boxplots représentant la taille des individus en fonction du type de marquage et du site d'études (les étoiles signifient une différence significative entre les individus marqués en acoustique et ceux marqués en RFID et également une différence significative entre les individus marqués en acoustique et l'ensemble des individus mesurés aux Grandes Cabanes).

La première année, cette marque a été réalisée selon un code couleur en fonction du bassin de capture : vert uniquement pour les individus du bassin des Grandes Cabanes, et rouge magenta et vert pour les individus du canal du Fumemorte. La seule anguille recapturée du canal du Fumemorte, marquée avec du pigment rouge, était infectée au niveau de la nageoire dorsale (Figure A115). Nous avons donc décidé de n'utiliser que du pigment vert pour la saison 2024-2025.



Figure A113. Marque à la peinture acrylique sur la nageoire dorsale pour la saison 2023-2024 : verte si l'individu a été capturé dans les Grandes Cabanes, verte et rouge si l'individu a été capturé dans le canal du Fumemorte.

Collaboration avec les pêcheurs professionnels

Une campagne de communication a été réalisée auprès des pêcheurs pour les sensibiliser et les encourager à nous contacter en cas d'une éventuelle recapture dans leurs filets (Figure A114). Nous avons invité les pêcheurs à un apéro-repas à la Tour du Valat en septembre 2023 et à un goûter aux Grandes Cabanes en octobre 2023 et en novembre 2024 pour partager ce projet avec eux de vive voix. Malgré plusieurs inscriptions, les personnes en présentiel se sont fait finalement rares : un pêcheur pour le repas, deux pêcheurs pour le goûter 2023 et un pêcheur pour le goûter 2024. Cette collaboration s'est révélée efficace avec les deux pêcheurs professionnels avec qui nous avons le plus l'habitude de travailler. A chaque recapture, nous étions prévenus afin qu'une personne puisse se rendre sur place pour identifier l'individu à l'aide d'un lecteur portatif et celui-ci était ensuite relâché. En remerciements, le pêcheur était récompensé d'un cadeau OFB.



Figure A114. Affichette distribuée aux pêcheurs professionnels pour les encourager à rechercher dans leurs captures nos individus marqués.

Sur l'automne-hiver 2023-2024, 35 anguilles femelles argentées ont été équipés avec des marques acoustiques dans le bassin des Grandes Cabanes et 6 dans le canal du Fumemorte. Parmi ces individus marqués, 9 ont été recapturés et relâchés par les pêcheurs professionnels, et 5 lors de la campagne de pêche scientifique de mars 2024 aux Grandes Cabanes (Tableau 2). Ces recaptures ont été l'occasion de vérifier l'état de cicatrisation du marquage acoustique et l'état de visualisation de la marque à la peinture acrylique (Figure A115). Dans l'ensemble, les incisions étaient bien cicatrisées. Et nous avons un retour d'expérience du MNHN d'une durée de 1 mois pour la marque externe à la peinture acrylique. Ici, nous avons pu constater que 3 mois après le marquage, les marques étaient encore très visibles. Cependant, la deuxième année de suivi, nous n'avons eu que très peu de recaptures. Nous suspectons que cette deuxième année, la dose de peinture acrylique injectée n'était pas suffisante.



Figure A115. Recaptures d'individus marqués pour le suivi acoustique par les pêcheurs professionnels ou lors de la campagne de pêche scientifique de mars 2024 aux Grandes Cabanes. Vérification de l'état de cicatrisation et de visualisation de la marque externe.

Pour la saison 2024-2025, nous avons à nouveau convié les pêcheurs à un goûter pour leur présenter les résultats de la première année et les inciter à nouveau à vérifier leurs captures et à nous contacter si une anguille acoustique se retrouve dans leurs filets. Seul un pêcheur des Impériaux s'est présenté. Il s'était alors engagé à informer et distribuer nos affiches aux autres pêcheurs des Impériaux. Pour la saison 2023-2024, les niveaux d'eau étaient tellement bas et la salinité tellement haute que les pêcheurs des Impériaux n'ont pas pu travailler. En revanche, les conditions de pêche étaient à nouveau favorables pour la saison 2024-2025. Nous avons échangé individuellement avec les deux pêcheurs professionnels aux embouchures de nos bassins pour les prévenir de cette nouvelle saison de suivi acoustique.

Malgré un plus grand nombre d'individus marqués (61 aux grandes Cabanes et 19 dans le canal du Fumemorte), seulement deux recaptures ont été réalisées. L'une d'entre elle a été recapturée lors d'une session de marquage RFID par l'association MRM, qui équipait des anguilles du pêcheur localisé à proximité du bassin des Grandes Cabanes. Sans l'intervention de l'association MRM, cette anguille serait sans doute passée inaperçue. Le peu de recaptures de cette année nous interroge sur l'efficacité de notre marquage acrylique. A l'avenir, une solution doit être identifiée pour y remédier.

Cette année, le mareyeur Eurogeal, l'un des 5 principaux mareyeurs opérant en Camargue, a été équipé par une antenne RFID par l'association MRM, dans le but de tester ce dispositif. Cette antenne a été mise en fonctionnement au moins durant la période de novembre 2024 à janvier 2025. Ce suivi a permis de détecter 12 individus provenant des Grandes Cabanes et un individu du canal du Fumemorte. Parmi les 12 individus capturés des Grandes Cabanes, deux individus étaient marqués en acoustique. Cela confirme bien qu'il y a eu des recaptures acoustiques par les pêcheurs professionnels qui sont passés inaperçus.

Annexe 18 – Exploration des détections acoustiques

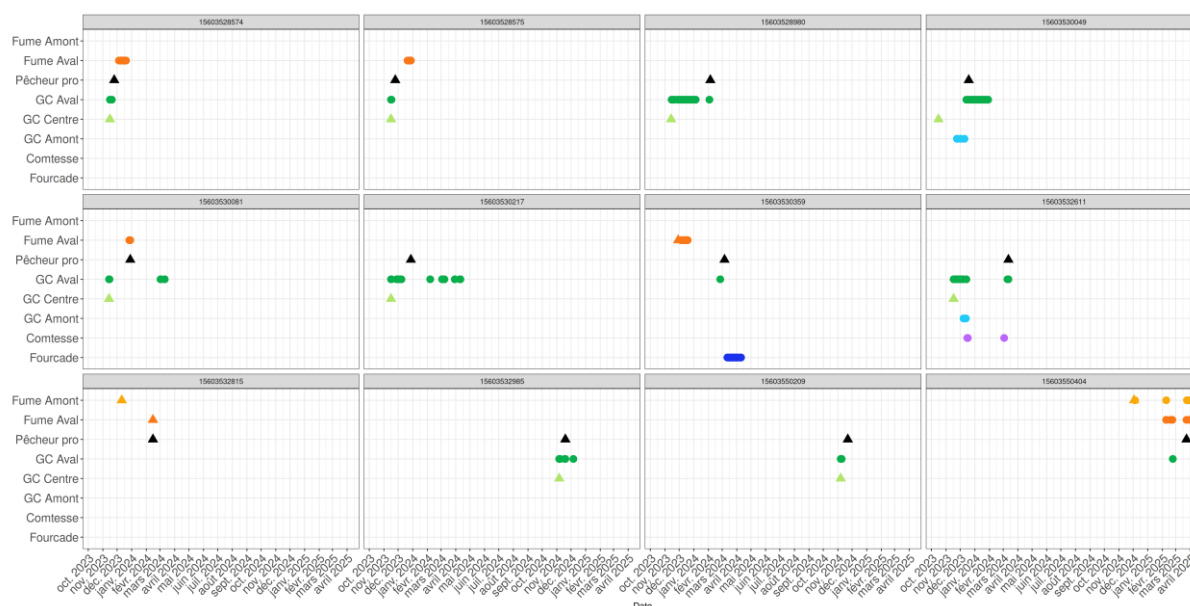


Figure A116 : Détections par pêche (triangle) ou acoustique (rond) au cours du temps pour les 12 individus recapturés par un pêcheur professionnel dans l'étang du Vaccarès

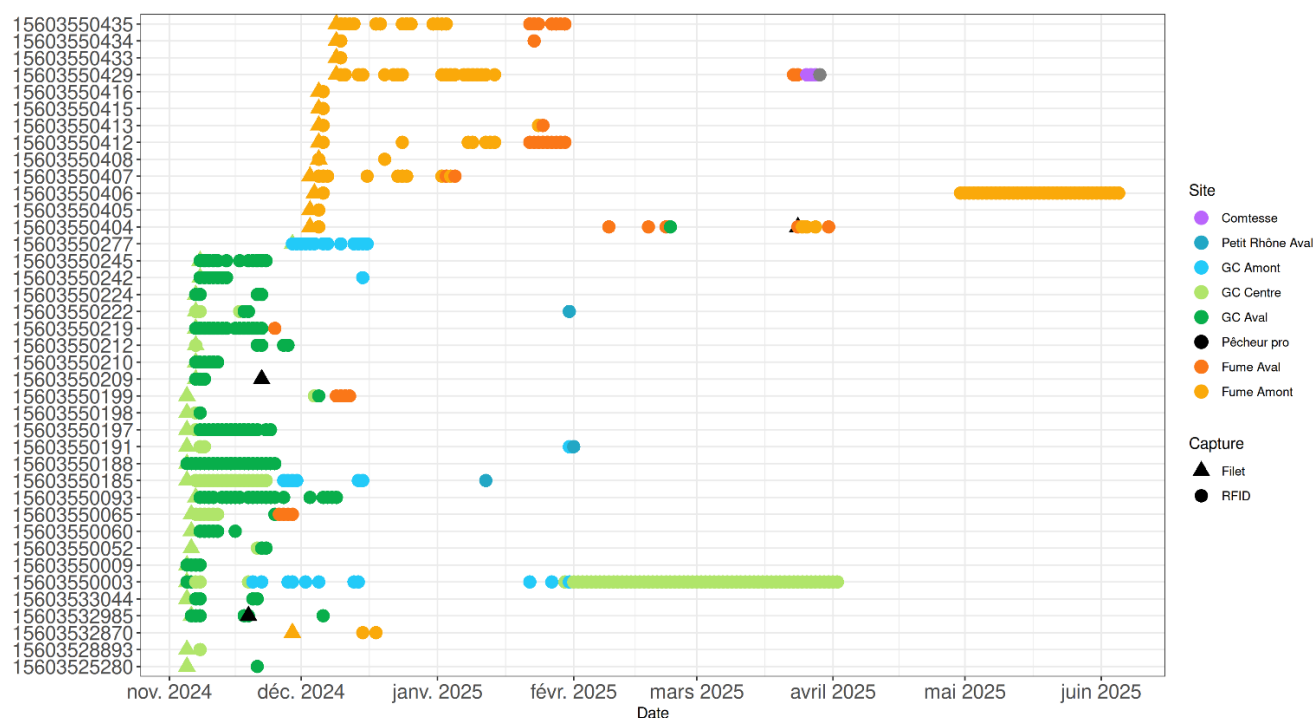


Figure A117 : Détections par pêche (triangle) ou acoustique (rond) au cours du temps pendant la saison 2024-2025 pour les 39 individus équipés d'un émetteur intégrant un capteur de prédation et détectés au moins une fois par un hydrophone.

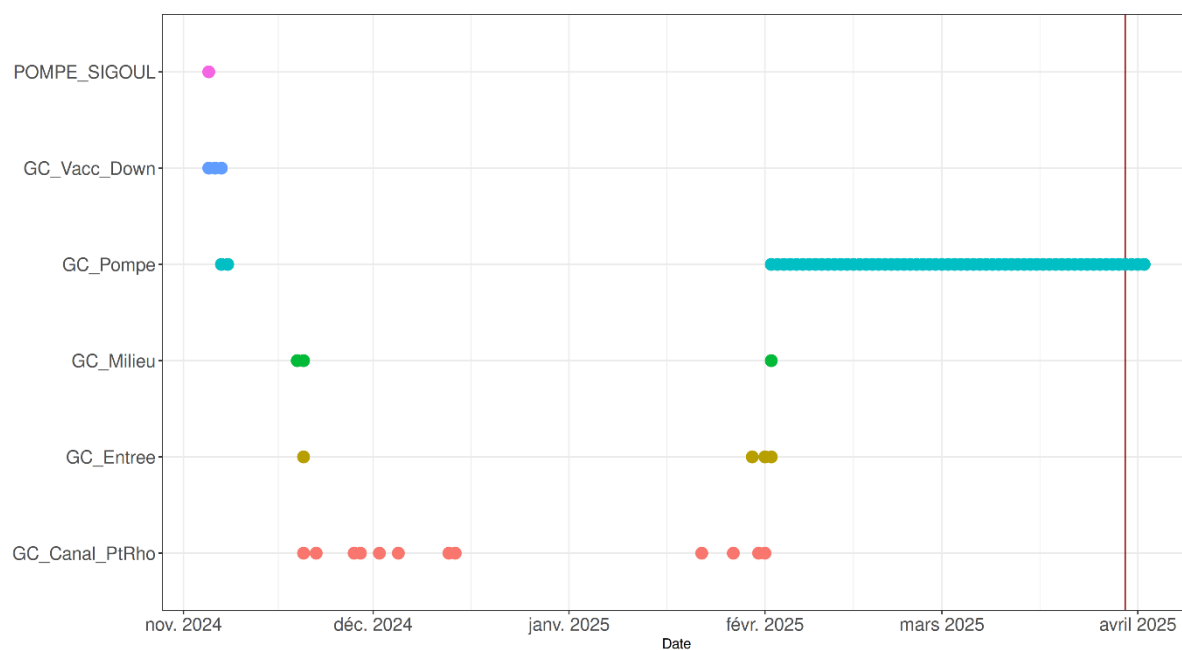


Figure A118 : Détails du déplacement de l'individu #15603550003 relâché le 5 novembre 2024 et prédaté en mars 2025 aux Grandes Cabanes.

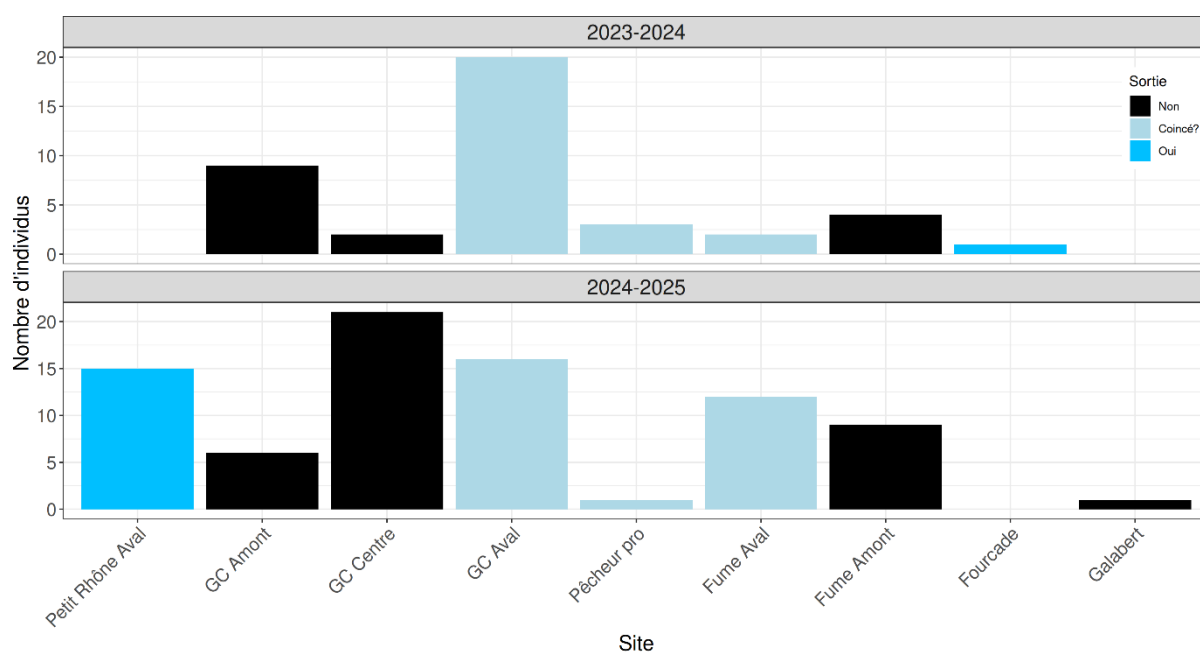


Figure A119 : Nombre d'individus marqués en acoustique en fonction de leur dernier lieu de détection par année de suivi. Le code couleur correspond à leur situation d'échappement : Non = n'est pas sorti de son bassin ; Coincé ? = n'est pas sorti de l'hydrosystème du Vaccarès ; Oui = est parvenu à une issue vers la mer.

Annexe 19 – Analyse d’images satellites

Un travail exploratoire a été réalisé à partir des images satellites sentinelles afin de caractériser la continuité à l’intérieur du système du Vaccarès. Les résultats ont été peu concluants. Seulement 2 à 3 images par mois sont disponibles, lorsque la couverture nuageuse est nulle. Or les niveaux d’eau peuvent varier en quelques heures, notamment suite à un coup de vent Nord (mistral). De plus, il suffit que le sédiment soit simplement humide pour être interprété en eau, alors que la zone est asséchée. Ainsi les images obtenues n’ont pas permis de refléter les observations d’assecs qui ont notamment été faites par les agents de la SNPN. Les images ci-dessous, avec des niveaux d’eau très contrastées, sont montrées à titre illustratif (Figure A120). Elles ne correspondent pas aux périodes d’échappement étudiées.

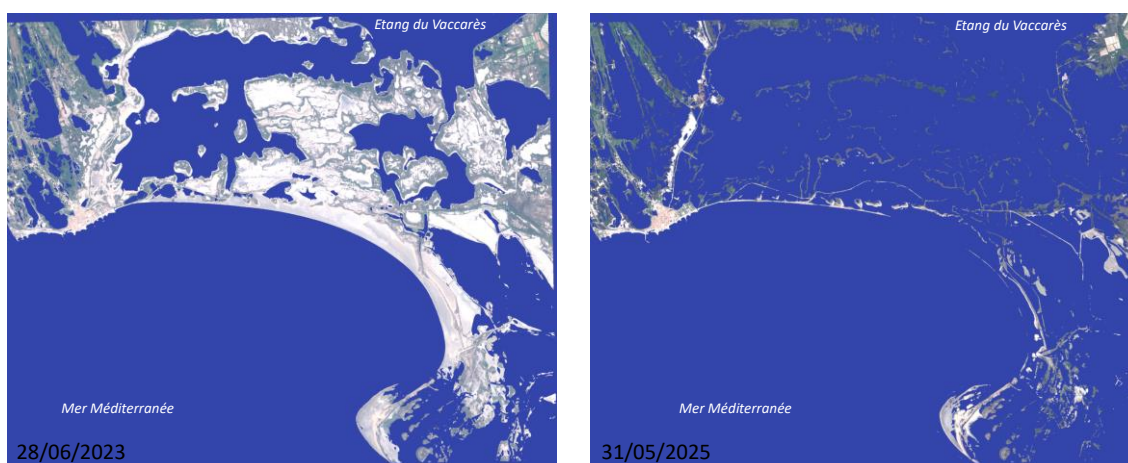


Figure A120 : Traitement d’images satellites sentinelles pour faire ressortir les zones en eau dans la partie sud de l’hydrosystème du Vaccarès (L. Willm Tour du Valat)

Annexe 20 – Communication

Date	Type	Description
2022	Vidéo	Un petit film de 3'22 a été réalisé par l'association Le Gobie afin d'informer de manière succincte, rapide et ludique le lancement du projet COLAGANG.
17/04/2023	Emission Radio	France Inter – La Terre au Carré - Episode 1/5 – La Camargue : dans les bras du Delta
06/2023	COFIL	Premier comité de pilotage du projet
08/2023	Newsletter	Article dans la Newsletter « Le petit migrateur » édité par l'Association MRM
10/2023	Conférence	Quizz et tables rondes autour de la biologie de conservation des espèces de poisson. Sujet traité : <i>Connectivité écologique intra-lagunaire : suivi des déplacements migratoires de l'anguille européenne</i> . Sciences Pluri'elles, La recherche sur le fleuve au féminin , CPE, Arles.
02/2024	Article de presse	Article La Salamandre/Reporterre avec le volet 1 publié sur le site de la Salamandre, https://www.salamandre.org/article/anguille-europeenne-mysterieuse-migratrice-extinction-traffic/ , et le volet 2, publié sur le site de Reporterre, https://reporterre.net/L-anguille-francaise-victime-d-un-vaste-traffic-international
14/03/2024	CTPOMI	Premiers résultats exposés lors de la Commission Technique des Poissons Migrateurs (CTPOMI, en visio)
3/06/2024	COFIL	Deuxième comité de pilotage du projet
10/2024	Conférence	Ecological connectivity inside a Mediterranean lagoon: Outmigration dynamic of <i>Anguilla anguilla</i> . Rencontres télémétrie 2024 , Genève, Suisse.
11/2024	CTPOMI	Présentations des résultats préliminaires au Groupe de Travail Anguille Lagunes (en visio)
12/2024	Groupe de travail	Présentation du projet et des premiers résultats du projet aux Journées Techniques Monitoring Anguille (JTMA) 2024, Tour du Valat
09/2025	WGEEL	Présentation orale intitulée « Eel monitorings within a Mediterranean lagoon ». European Working Group on Eel (WGEEL) , Rennes
10/2025	Journée d'échanges chercheurs - gestionnaires	Présentation orale intitulée « Fenêtres de migration des anguilles en lagunes et marais littoraux : bilan des études et perspectives méthodologiques ». Journée d'échanges – Continuité écologique et accueil piscicole en marais littoraux : réflexion collective pour des outils d'aide à la gestion , Pérols.
11/2025	Journées MRM	Présentation orale intitulée « Connectivité écologique intra-lagunaire : Etude de la dynamique de dévalaison de l'anguille européenne à l'intérieur du delta du Rhône. Bilan des 5 années du projet COLAGANG. » Journées des Poissons Migrateurs en Rhône-Méditerranée, 8^{ème} édition , Lyon.
12/2025	CTPOMI	Présentations des principaux résultats du projet à la CTPOMI (en visio)
12/2025	Vidéo	Un film de 4'48 a été réalisé par l'association Le Gobie pour présenter les principaux résultats du projet COLAGANG au grand public

Références

- Aarestrup, K., E. B. Thorstad, A. Koed, N. Jepsen, J. C. Svendsen, M. I. Pedersen, C. Skov, and F. Økland. 2008. Survival and behaviour of European silver eel in late freshwater and early marine phase during spring migration. *Fisheries Management and Ecology* 15:435–440.
- Acou, A., P. Laffaille, A. Legault, and E. Feunteun. 2008. Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish* 17:432–442.
- Acou, A., F. Lefebvre, P. Contournet, G. Poizat, J. Panfili, and A. J. Crivelli. 2003. Silvering of female eels (*Anguilla anguilla*) in two sub-populations of the Rhone Delta. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*:55–68.
- Allouche, A., A. Dervieux, and L. Nicolas. 2015. Adaptation aux changements par renaturation dans une zone humide littorale, le delta du Rhône (France du sud). Une réponse à l'épuisement d'une gestion concertée de l'eau ? *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*.
- Amilhat, E., H. Farrugio, R. Lecomte-Finiger, G. Simon, and P. Sasal. 2008. Silver eel population size and escapement in a Mediterranean lagoon: Bages-Sigean, France. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*:05.
- Aroua, S., M. Schmitz, S. Baloché, B. Vidal, K. Rousseau, and S. Dufour. 2006. Endocrine Evidence that Silvering, a Secondary Metamorphosis in the Eel, Is a Pubertal Rather than a Metamorphic Event. *Neuroendocrinology* 82:221–232.
- Bass, A. L., G. R. Giannico, and G. T. Brooks. 2012. Performance of a Full-Duplex Passive Integrated Transponder (PIT) Antenna System in Estuarine Channels. *Marine and Coastal Fisheries* 4:145–155.
- Basset, A., S. Arima, M. Bastianini, F. Bernardi Aubry, F. Cardone, F. Cavarro, E. Cecere, G. Corriero, G. D'Onghia, S. Finoito, N. Fiore, P. Franzoi, L. Gaudiano, A. Giangrande, G. Jona Lasinio, E. Keppel, C. Longo, A. Ludovisi, S. Malavasi, F. Mastrotoaro, M. Mistri, C. Munari, C. Nonnis Marzano, A. Pollice, A. Petrocelli, C. Pierri, M. Pinna, A. Pugnetti, I. Rosati, L. Roselli, A. Sfriso, M. Sigovini, R. Sorino, E. Stanca, D. Tagliapietra, and M. Zucchetta. 2013. Lagoon and Habitat (EUNIS) fragility to alien species in Mediterranean lagoons. *EuroMedLag-Lagunet*.
- Besson, M. L., T. Trancart, A. Acou, F. Charrier, V. Mazel, A. Legault, and E. Feunteun. 2016. Disrupted downstream migration behaviour of European silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river. *Environmental Biology of Fishes* 99:779–791.
- Blondel, J., G. Barruol, and R. Vianet. 2019. *L'encyclopédie de la Camargue*. Nouvelle éd. Buchet-Chastel, Paris.
- Bourillon, B. 2021. Variations biogéographiques et temporelles des traits de vie des anguilles argentées (*Anguilla anguilla*) en réponse aux changements environnementaux et à la contamination chimique.
- Boutron, O., C. Paugam, E. Luna-Laurent, P. Chauvelon, D. Sous, V. Rey, S. Meulé, Y. Chérain, A. Cheiron, and E. Migne. 2021. Hydro-Saline Dynamics of a Shallow Mediterranean Coastal Lagoon: Complementary Information from Short and Long Term Monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering* 9:701.
- Briand, C., B. Sauvaget, and G. Eriau. 2020. Suivi de la dévalaison d'anguilles argentées en 2018-2019 (7ème année) sur la Vilaine à l'aide d'un DIDSON. Technical Report, EPTB Vilaine.
- Brujls, M. C. M., and C. M. F. Durif. 2009. Silver Eel Migration and Behaviour. Pages 65–95 in G. van den Thillart, S. Dufour, and J. C. Rankin, editors. *Spawning Migration of the European Eel: Reproduction Index, a Useful Tool for Conservation Management*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Carpentier, A., L. Marion, J.-M. Paillisson, A. Acou, and E. Feunteun. 2009. Effects of commercial fishing and predation by cormorants on the *Anguilla anguilla* stock of a shallow eutrophic lake. *Journal of Fish Biology* 74:2132–2138.
- Cataudella, S., D. Crosetti, and F. Massa. 2015. Mediterranean coastal lagoons: sustainable management and interactions among aquaculture, capture fisheries and the environment. *Studies and Reviews General Fisheries Commission for the Mediterranean. GFCM Studies and Reviews* 95.
- Charrier, F., N. Belhamiti, M. Alligne, and Y. Berthelot. 2022. SUIVI DES MIGRATIONS D'ANGUILLES ET EVALUATION DES STOCKS EN PLACE SUR LE FREMUR EN 2021.
- Charrier, F., V. Mazel, J.-M. Caraguel, Y. Abdallah, L. L. Le Gurun, A. Legault, and P. Laffaille. 2012. Escapement of silver-phase European eels, *Anguilla anguilla*, determined from fishing activities in a Mediterranean lagoon (Or, France). *ICES Journal of Marine Science* 69:30–33.
- Chauvelon, P. 1996. Hydrologie quantitative d'une zone humide méditerranéenne aménagée: le Bassin du Fumemorte en Grande Camargue, delta du Rhône. Thèse doctorat: mécanique, génie mécanique, génie civil: USTL Montpellier.
- 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. *Hydrobiologia* 373:181–191.
- Cheiron, A. (Coord.). 2018. Rapport d'activité 2017 de la Réserve Naturelle Nationale de Camargue. Page 242. Société nationale de protection de la nature - Réserve Naturelle Nationale de Camargue.
- Ciccotti, E. (ed), and E. B. (ed) Morello. 2023. European eel in the Mediterranean Sea – Outcomes of the GFCM Research programme. (General Fisheries Commission for the Mediterranean). FAO, Rome.
- Cullen, P., and T. K. McCarthy. 2003. Hydrometric and Meteorological Factors Affecting the Seaward Migration of Silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in the Lower River Shannon. *Environmental Biology of Fishes* 67:349–357.
- Daverat, F., L. Beaulaton, R. Poole, P. Lambert, H. Wickström, J. Andersson, M. Aprahamian, B. Hizem, P. Elie, S. Yalçın-Özdilek, and A. Gumus. 2012. One century of eel growth: changes and implications. *Ecology of Freshwater Fish* 21:325–336.

- Daverat, F., K. E. Limburg, I. Thibault, J.-C. Shiao, J. J. Dodson, F. Caron, W.-N. Tzeng, Y. Iizuka, and H. Wickström. 2006. Phenotypic plasticity of habitat use by three temperate eel species, *Anguilla anguilla*, *A. japonica* and *A. rostrata*. *Marine Ecology Progress Series* 308:231–241.
- Daverat, F., and J. Tomás. 2006. Tactics and demographic attributes in the European eel *Anguilla anguilla* in the Gironde watershed, SW France. *Marine Ecology Progress Series* 307:247–257.
- Dekker, W. 2003. On the distribution of the European eel (*Anguilla anguilla*) and its fisheries. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60:787–799.
- Dervieux, A., G. Jolly, and A. Allouche. 2006. Gestion de l'eau et projet de territoire : vers une gestion intégrée du delta du Rhône. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*.
- Durieux, E., K. Le Corre, G. Marchessaux, D. Veyssiere, S. Etourneau, and M. Garrido. 2025. Movements and habitat use of the invasive blue crab *Callinectes sapidus* in a Mediterranean coastal lagoon.
- Durif, C., S. Dufour, and P. Elie. 2005. The silvering process of *Anguilla anguilla*: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *Journal of Fish Biology* 66:1025–1043.
- Durif, C., P. Elie, C. Gosset, J. Rives, and F. Travade. 2002. Behavioral Study of Downstream Migrating Eels by Radio-telemetry at a Small Hydroelectric Power Plant.
- Durif, C., A. Guibert, P. Elie, J. M. Casselman, and D. Cairns. 2009. Morphological Discrimination of the Silvering Stages of the European Eel. Eels at the edge: Science, Status and Conservation Concerns, AFS:103.
- Durif, C. M. F., O. H. Diserud, O. T. Sandlund, E. B. Thorstad, R. Poole, K. Bergesen, R. H. Escobar-Lux, S. Shema, and L. A. Vøllestad. 2020. Age of European silver eels during a period of declining abundance in Norway. *Ecology and Evolution*.
- Durif, C. M. F., and P. Elie. 2008. Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data. *Fisheries Management and Ecology* 15:127–137.
- Edeline, E., S. Dufour, and P. Elie. 2009. Proximate and Ultimate Control of Eel Continental Dispersal. Pages 433–461 in G. van den Thillart, S. Dufour, and J. C. Rankin, editors. *Spawning Migration of the European Eel: Reproduction Index, a Useful Tool for Conservation Management*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Feunteun, E., A. Acou, P. Laffaille, and A. Legault. 2000. European eel (*Anguilla anguilla*): prediction of spawner escapement from continental population parameters 57.
- Feunteun, E., and L. Marion. 1994. Assessment of Grey Heron predation on fish communities: the case of the largest European colony. *Hydrobiologia* 279:327–344.
- Gelman, A., J. Hwang, and A. Vehtari. 2014. Understanding predictive information criteria for Bayesian models. *Statistics and Computing* 24:997–1016.
- Gelman, A., C. P. Robert, and J. Rousseau. 2013. Inherent difficulties of non-Bayesian likelihood-based inference, as revealed by an examination of a recent book by Aitkin. *Statistics & Risk Modeling* 30:105–120.
- Gelman, A., and D. B. Rubin. 1992. Inference from Iterative Simulation Using Multiple Sequences. *Statistical Science* 7:457–472.
- Gimenez, O., V. Rossi, R. Choquet, C. Dehais, B. Doris, H. Varella, J.-P. Vila, and R. Pradel. 2007. State-space modelling of data on marked individuals. *Ecological Modelling* 206:431–438.
- van Ginneken, V., C. Durif, S. P. Balm, R. Boot, M. Verstegen, E. Antonissen, and G. van den Thillart. 2007. Silvering of European eel (*Anguilla anguilla* L.): seasonal changes of morphological and metabolic parameters. *Animal Biology* 57:63–77.
- Giraud, J. 2021. Evaluation de l'efficacité du dispositif RFID pour le suivi de l'anguille d'Europe. Montpellier SupAgro, Montpellier.
- Heurteaux, P. 1969. 1. Recherches sur les rapports des eaux souterraines avec les eaux de surface (etangs, marais, rizieres), les sols halomorphes et la vegetation en Camargue. 2. Recherches sur l'évaporation des surfaces d'eau libre en Camargue. Thèse doctorat ès sciences naturelles: Fac Sci Montpellier.
- Horton, G. E., T. L. Dubreuil, and B. H. Letcher. 2007. A Model for Estimating Passive Integrated Transponder (PIT) Tag Antenna Efficiencies for Interval-Specific Emigration Rates. *Transactions of the American Fisheries Society* 136:1165–1176.
- Hoste, A. 2024, December 16. Croissance de l'anguille européenne en milieu lagunaire méditerranéen : comparaison inter-habitats de la démographie, des tactiques d'utilisation de l'habitat et de la condition des futurs géniteurs. Thèse, Aix-Marseille.
- Hoste, A., C. Bouchard, J. Poggiale, and D. Nicolas. 2024. European eel (*Anguilla anguilla*) survival modeling based on a 22-year capture-mark-recapture survey of a Mediterranean subpopulation. *Journal of Fish Biology*:jfb.15939.
- Hoste, A., R. Lagarde, E. Amilhat, C. Bouchard, P. Bustamante, A. Covaci, E. Faliex, E. Migne, G. Poma, C. Tetrel, K. Verbrugghe, H. Vey Payre, and D. Nicolas. 2025. Investigating the quality of European silver eels by quantifying contaminants and parasite infestation in a French Mediterranean lagoon complex. *Environmental Science and Pollution Research* 32:4181–4198.
- ICES and WGEEL. 2025. Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eels (WGEEL). Page 27447347 Bytes, 134. ICES Scientific Reports.
- Lambremon, J., and D. Rivoallan. 2021. Influence des stations de pompage du Rhône sur les anguilles en migration. Campagne d'Études 2020. Page 29 p + annexes. Association Migrateurs Rhône Méditerranée.
- Lambremon, J., and D. Rivoallan. 2022. Influence des stations de pompage du Rhône aval sur les anguilles en migration. Page 14. Association Migrateurs Rhône Méditerranée.

- Le Gallou, I., R. Lagarde, K. Joseph, G. Simon, E. Amilhat, and E. Faliex. 2025. Rapport scientifique du projet FLUX4 : suivis 2024-2025 du recrutement des civelles et de l'échappement des anguilles argentées dans la lagune de Bages-Sigean. Page 54 pp. + annexes. CEFREM Université de Perpignan Via Domitia.
- Lunar Phase. 2014, July 16. https://web.archive.org/web/20140716104947/http://mysite.verizon.net/res148h4j/zenosamples/zs_lunarphasealc.html.
- Manceau, N. (coord). 2020a. Elaboration d'un plan de gestion multi-sites sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer en Camargue - Etat des lieux et diagnostic. Page 268. Les Ecologistes de l'Euzières, ECOSYS, CCE&C, Conservatoire du littoral.
- Manceau, N. (coord). 2020b. Elaboration d'un plan de gestion multi-sites sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer en Camargue - Atlas cartographique. Les Ecologistes de l'Euzières, ECOSYS, CCE&C, Conservatoire du littoral.
- Mateo, M. 2017. Réponses adaptatives des anguilles tempérées à l'hétérogénéité environnementale: mécanismes évolutifs, menaces liées au changement global et conséquences pour la conservation. Université de Bordeaux.
- Melià, P., D. Bevacqua, A. J. Crivelli, G. A. De Leo, J. Panfili, and M. Gatto. 2006. Age and growth of *Anguilla anguilla* in the Camargue lagoons. *Journal of Fish Biology* 68:876–890.
- Miller, M. J., S. Bonhommeau, P. Munk, M. Castonguay, R. Hanel, and J. D. McCleave. 2015. A century of research on the larval distributions of the Atlantic eels: a re-examination of the data. *Biological Reviews* 90:1035–1064.
- Miller, M. J., H. Westerberg, H. Sparholt, K. Wysujack, S. R. Sørensen, L. Marohn, M. W. Jacobsen, M. Freese, D. J. Ayala, J.-D. Pohlmann, J. C. Svendsen, S. Watanabe, L. Andersen, P. R. Møller, K. Tsukamoto, P. Munk, and R. Hanel. 2019. Spawning by the European eel across 2000 km of the Sargasso Sea. *Biology Letters* 15:20180835.
- Mollier, E. 2021. Caractérisation de la dynamique de dévalaison de l'anguille européenne dans un canal de drainage camarguais. Mémoire de fin d'études d'ingénieur INRAE, Spécialisation sciences halieutiques et aquacole, Agrocampus ouest, Rennes.
- Monteiro, R. M., I. Domingos, P. R. Almeida, J. L. Costa, C. M. Alexandre, and B. R. Quintella. 2020. Migration and escapement of silver eel males, *Anguilla anguilla*, from a southwestern European river. *Ecology of Freshwater Fish* 29:679–692.
- MRE, and Naturalia. 2018. Inventaire piscicole des marais des Grandes Cabanes. Page 28. ONCFS, Maison régionale de l'eau, Naturalia.
- Munaron, D., Derolez, V., Foucault, E., Cimiterra, N., Tapie, N., Budzinski, H., and Giraud, A. 2020. OBSLAG - Volet Pesticides : Bilan 2017-2019 du suivi des lagunes méditerranéennes. Page 78. Rapport final.
- Nicolas, D., E. Mollier, J. Giraud, A. Richard, P. Contournet, E. Luna-Laurent, and S. Hilaire. 2021. Suivi télémétrique de la dévalaison de l'anguille européenne dans le bassin du Fumemorte. Action MA8 du Contrat de delta Camargue 2017-2019, Rapport final. Page 56. Tour du Valat, Arles.
- Panfili. 2002. Manuel de sclérochronologie des poissons. IRD Éditions.
- Panfili, J., C. Boulenger, C. Musseau, and A. J. Crivelli. 2022. Extreme variability in European eel growth revealed by an extended mark and recapture experiment in southern France and implications for management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79:631–641.
- Panfili, J., A. Darnaude, Y. Lin, M. Chevalley, Y. Iizuka, W. Tzeng, and A. Crivelli. 2012. Habitat residence during continental life of the European eel *Anguilla anguilla* investigated using linear discriminant analysis applied to otolith Sr:Ca ratios. *Aquatic Biology* 15:175–185.
- Panfili, J., D. Nicolas, K. Diop, and A. J. Crivelli. 2024. Life-history traits of the invasive and biggest European freshwater fish, the wels catfish (*Silurus glanis*) show high potential for colonisation in Southern Europe. *Marine and Freshwater Research* 75.
- Pénil, C., Beaulaton, L., Gatel, F., and Girard, P. 2011, July. Guide pratique d'évaluation de l'état sanitaire des anguilles - méthode non létale d'identification des principales lésions anatomo-morphologiques et des principaux parasites externes de l'anguille. Onema.
- Pérez-Ruzafa, A., C. Marcos, and I. M. Pérez-Ruzafa. 2011. Mediterranean coastal lagoons in an ecosystem and aquatic resources management context. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 36:160–166.
- Pike, C., V. Crook, and M. Gollock. 2020. IUCN Red List of Threatened Species: *Anguilla anguilla*. IUCN Red List of Threatened Species.
- Poizat, G., P. Chauvelon, E. Rosecchi, A. J. Crivelli, and P. Contournet. 1999. Passage de poissons du Rhône par les pompes d'irrigation de Camargue : premiers résultats. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*:31–43.
- Poulet, N. 2004. Le sandre (*Sander lucioperca* (L.)): biologie, comportement et dynamique des populations en Camargue (Bouches du Rhône, France). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Pujolar, J. M., M. W. Jacobsen, T. D. Als, J. Frydenberg, K. Munch, B. Jónsson, J. B. Jian, L. Cheng, G. E. Maes, L. Bernatchez, and M. M. Hansen. 2014. Genome-wide single-generation signatures of local selection in the panmictic European eel. *Molecular Ecology* 23:2514–2528.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Raynard, É. 2025. Dynamique de dévalaison de l'Anguille Européenne dans un hydrosystème lagunaire en Camargue. Rapport de stage : M2, Université de Pau et des pays de l'Adour, Pau.
- Reckordt, M., C. Ubl, C. Wagner, J. Frankowski, and M. Dorow. 2014. Downstream migration dynamics of female and male silver eels (*Anguilla anguilla* L.) in the regulated German lowland Warnow River. *Ecology of Freshwater Fish* 23:7–20.

- Richard, M., F. Forget, A. Mignucci, S. Mortreux, P. Le Gall, M. Callier, A. Weise, C. McKindsey, and J. Bourjea. 2020. Farmed bivalve loss due to seabream predation in the French Mediterranean Prevost Lagoon. *Aquaculture Environment Interactions* 12:529–540.
- Ricque, F., Bélenguier, Luc, E. Migne, and G. Hemery. 2025. Plan de Sauvegarde du vaccarès, synthèse. Page 32. SNPN -Réserve naturelle nationale Camargue, Arles.
- Righton, David, Westerberg, Hakan, Feunteun, Eric, Okland, Finn, Gardan, Patrick, Amilhat, Elsa, Metcalfe, Julian, Lobon-Cervia, Javier, Sjöberg, Niklas, Simon, Janek, Acou, Anthony, Vedor, Marisa, Walker, Alan, Trancart, Thomas, Brämick, Uwe, and Aerestrup, Kim. 2016. Empirical observations of the spawning migration of European eels: The long and dangerous road to the Sargasso Sea. *Behavioral Ecology* 2:e1501694.
- Rosecchi, E., P. Chauvelon, G. Poizat, and A. J. Crivelli. 1998. Conséquences de la variabilité hydro-saline d'un complexe lagunaire méditerranéen, induite par la gestion hydraulique et les contraintes climatiques, sur ses peuplements piscicoles: Le cas du système Vaccarès.
- Sandlund, O. T., O. H. Diserud, R. Poole, K. Bergesen, M. Dillane, G. Rogan, C. Durif, E. B. Thorstad, and L. A. Vøllestad. 2017. Timing and pattern of annual silver eel migration in two European watersheds are determined by similar cues. *Ecology and Evolution* 7:5956–5966.
- Schmidt, J. 1923. Breeding Places and Migrations of the Eel. *Nature* 111:51–54.
- van de Schoot, R., S. Depaoli, R. King, B. Kramer, K. Märtens, M. G. Tadesse, M. Vannucci, A. Gelman, D. Veen, J. Willemsen, and C. Yau. 2021. Bayesian statistics and modelling. *Nature Reviews Methods Primers* 1:1.
- Tabouret, H., G. Bareille, F. Claverie, C. Pécheyran, P. Prouzet, and O. F. X. Donard. 2010. Simultaneous use of strontium:calcium and barium:calcium ratios in otoliths as markers of habitat: Application to the European eel (*Anguilla anguilla*) in the Adour basin, South West France. *Marine Environmental Research* 70.
- Teichert, N., B. Bourillon, K. Suzuki, A. Acou, A. Carpentier, M. Kuroki, D. Righton, T. Trancart, L.-S. Virag, A. Walker, T. Otake, and E. Feunteun. 2023. Biogeographical snapshot of life-history traits of European silver eels: insights from otolith microchemistry. *Aquatic Sciences* 85:39.
- Teichert, N., S. Tétard, T. Trancart, E. de Oliveira, A. Acou, A. Carpentier, B. Bourillon, and E. Feunteun. 2020. Towards transferability in fish migration models: A generic operational tool for predicting silver eel migration in rivers. *Science of The Total Environment* 739:140069.
- Tesch, F. -W. 2003. The Eel. Page (J. E. Thorpe, Ed.). First edition. Wiley.
- Thibault, I., J. J. Dodson, F. Caron, W.-N. Tzeng, Y. Iizuka, and J.-C. Shiao. 2007. Facultative catadromy in American eels: testing the conditional strategy hypothesis. *Marine Ecology Progress Series* 344:219–229.
- Trancart, T., E. Feunteun, V. Danet, A. Carpentier, V. Mazel, F. Charrier, M. Druet, and A. Acou. 2017. Migration behaviour and escapement of European silver eels from a large lake and wetland system subject to water level management (Grand-Lieu Lake, France): New insights from regulated acoustic telemetry data. *Ecology of Freshwater Fish*:n/a-n/a.
- Trancart, T., E. Robin, A. Acou, Associations agréées des pêcheurs professionnels, C. Boisneau, A. Carpentier, F. Charrier, E. De Oliveira, J. Dublon, É. Feunteun, É. Gharnit, P. Jugé, J. Lamoureux, Y. Le Péru, A. Lizé, P. Rault, R. Roy, F. Santoul, Structures associatives agréées de la pêche loisir, N. Teichert, and L.-S. Virag. 2023. GLANISPOMI : Etude globale de la prédation des migrateurs amphihalins par les silures (*Silurus glanis*) sur le bassin de la Loire. Page 288.
- de Valpine, P., D. Turek, C. J. Paciorek, C. Anderson-Bergman, D. T. Lang, and R. Bodik. 2017. Programming with models: writing statistical algorithms for general model structures with NIMBLE. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 26:403–413.
- Vehtari, A., A. Gelman, D. Simpson, B. Carpenter, and P.-C. Bürkner. 2021. Rank-Normalization, Folding, and Localization: An Improved $R^{\hat{}}$ for Assessing Convergence of MCMC (with Discussion). *Bayesian Analysis* 16:667–718.
- Vélez-Espino, L. A., and M. A. Koops. 2010. A synthesis of the ecological processes influencing variation in life history and movement patterns of American eel: towards a global assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 20:163–186.
- Vey-Payre, H. 2022. Comparaison des sous-populations d'anguille européenne dans quatre milieux contrastés de Camargue par otolithométrie. Page 44. Master 2 : Ethologie, parcours Ethologie – Ecologie, OFB / Tour du Valat / Université de Perpignan, Université Jean Monnet à Saint-Étienne.
- Vøllestad, L. A., B. Jonsson, N. A. Hvidsten, T. F. Næsje, Ø. Haraldstad, and J. Ruud-Hansen. 1986. Environmental Factors Regulating the Seaward Migration of European Silver Eels (*Anguilla anguilla*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 43:1909–1916.
- Vøllestad, L. A., B. Jonsson, N.-A. Hvidsten, and T. F. Næsje. 1994. Experimental test of environmental factors influencing the seaward migration of European silver eels. *Journal of Fish Biology* 45:641–651.
- Watanabe, S. 2010, October 13. Asymptotic Equivalence of Bayes Cross Validation and Widely Applicable Information Criterion in Singular Learning Theory. arXiv.
- Watanabe, S. 2021. WAIC and WBIC for mixture models. *Behaviormetrika* 48:5–21.