



HAL
open science

Évaluation des routes de dévalaison des anguilles argentées du Rhône à travers l'aménagement hydroélectrique de Caderousse - (Compagnie Nationale du Rhône)

Hervé Capra, Hervé Pella

► **To cite this version:**

Hervé Capra, Hervé Pella. Évaluation des routes de dévalaison des anguilles argentées du Rhône à travers l'aménagement hydroélectrique de Caderousse - (Compagnie Nationale du Rhône). INRAE RiverLy. 2024, pp.202. hal-04849268

HAL Id: hal-04849268

<https://hal.inrae.fr/hal-04849268v1>

Submitted on 19 Dec 2024

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

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

INRAE CNR



Évaluation des routes de dévalaison des anguilles argentées du Rhône à travers l'aménagement hydroélectrique de Caderousse - (Compagnie Nationale du Rhône)

Projet de recherche/collaboration DAARAC 2017 – 2022

RAPPORT FINAL

Hervé CAPRA et Hervé PELLA (INRAE)

Décembre 2024

Avec la collaboration de :



Photo de couverture : Hervé PELLA – INRAE - 2019



DAARAC est une collaboration entre IRSTEA-INRAE et CNR co-financée de l'Agence de l'Eau RMC, de MRM, des pêcheurs professionnels et de l'OFB. Nous apprécierons sur cette photo l'efficacité d'une partie de cette collaboration avec de gauche à droite : Fanny Alix (MRM), Franck Pressiat (CNR), Florestan Giroud (Pêcheur professionnel) et Hervé Pella (IRSTEA-INRAE).

Note : Il est important de préciser ici que la notation Pk désigne les Points kilométriques du Rhône. Le Pk 0 est situé à la confluence Rhône-Saône et les valeurs des Pk sont croissantes vers l'aval.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

LISTE DES FIGURES.....	7
LISTE DES TABLEAUX.....	13
RÉSUMÉ.....	14
ABSTRACT.....	16
REMERCIEMENTS.....	18
PRESENTATIONS DU PROJET AU PUBLIC.....	18
INTRODUCTION.....	19
DÉPLOIEMENT DU MATÉRIEL.....	26
Les détecteurs.....	26
Les émetteurs ou marques acoustiques et leur détection.....	28
Le Post-traitement des données.....	32
Tests de détection.....	33
Fonctionnement des enregistreurs pendant l’expérimentation.....	38
CAPTURES ET MARQUAGE DES ANGUILLES.....	42
Capture des anguilles.....	43
Le protocole de biométrie et de marquage.....	43
Résultats du Marquage.....	45
Résultats de la biométrie.....	47
SYNTHESE DES OBSERVATIONS 2018-2022.....	50
Les détections aux portes.....	50
Passage aux portes.....	51
Quelques détails des passages aux portes de détection (hydrophones).....	56
Heures de détection des anguilles aux portes de détection.....	56
Délai entre marquage et détection aux différentes portes de détection.....	58
Temps de passage d’une porte de détection à une autre.....	60
Quelques déplacements « hors - norme ».....	61
Les relations dévalaison – débit & température.....	63
Analyse de la relation entre les simulations du modèle Teichert <i>et al.</i> (2020) et nos observations de dévalaison.....	67
Analyse des débits et températures en moyennes journalières sur les quatre années d’étude (An 1 à 4) en comparaison avec la période 2000-2022.....	67
LES SUIVIS MOBILES.....	79
Équipement utilisé.....	79
Échantillonnages.....	79
Résultats des prospections mobiles.....	82
Mobiles à l’amont de Caderousse.....	82
Mobiles à pied.....	84
Différences Jour – Nuit.....	84
Analyse des déplacements des individus contactés en amont de l’aménagement de Caderousse.....	84
DISCUSSION.....	89
Synthèse rapide.....	89
Discussion à propos de notre expérimentation.....	90
Un vrai challenge.....	90
Capture et marquage.....	92
La dévalaison.....	94
Passage Usine-turbines vs Barrage-Rcc.....	96
Effets du cumul des obstacles à la migration.....	97
Perspectives de recherche.....	98

Perspectives de gestion.....	99
ANNEXES.....	104
1- Feuille de route du projet DAARAC :.....	105
2- Illustrations de l’installation des détecteurs.....	106
3- Capture – Biometrie – Marquage.....	109
4- Extrait de la trame formulaire APAFIS – dossier d’éthique.....	114
6- Tests de détection.....	117
Aval Usine – PK218.....	117
RCC – PK218.....	118
PK220.....	119
ARLES – Grand Rhône – PK282.6.....	120
7- Fonctionnement des détecteurs sur les quatre années d’étude.....	121
Déversoir.....	122
Écluse.....	123
Usine.....	124
RCC.....	126
Pk220.....	128
Arles_Grand_Rhône.....	130
Arles_Petit_Rhône.....	132
8- Données brutes de passage aux portes de détection.....	133
9- Données cartographiques des prospections mobiles.....	140
Prospection mobiles amont de jour : individus mobiles.....	141
Monté.....	141
Descente.....	145
Monté - descente.....	148
Descente - monté.....	150
Descente – monté - descente.....	154
Prospection mobiles amont de jour : individus immobiles.....	156
Prospection mobiles amont de jour – cartographies par prospection.....	163
Prospection mobiles aval de jour – cartographies par prospection.....	180
10- Compte rendu du Séminaire CNR-INRAE sur la dévalaison de l’anguille argentée.....	185
11- Références bibliographiques.....	193
12- Quelques Rapports Scientifiques.....	199

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : vue générale de l'aménagement CNR de Caderousse (Google Earth – 2002).....22

Figure 2 : Localisation précise des hydrophones des portes de détection autour de l'aménagement CNR de Caderousse. Les différentes routes de dévalaison possibles sont : le Vieux Rhône – RCC (détection à la porte RCC (Pk 218.0, deux hydrophones) puis à la porte PK220 (deux hydrophones) ; L'écluse (détection à la porte Ecluse – porte de détection à un seul hydrophone (Pk 214.7) puis à la porte PK220) et l'Usine (détection à la porte Usine (Pk 218.0, deux hydrophones) puis à la porte PK220 ; un passage par le Deversoir, lorsqu'il est utilisé, est possible mais non détectable de manière certaine).....23

Figure 3 : Localisation précise des hydrophones des portes de détection en Arles, dans le Grand Rhône (en aval du Pont de Trinquette ; à Gauche) avec la porte de détection à deux hydrophones Arles (Pk282.6) et dans le Petit Rhône, à l'amont du Vieux pont de Fourques, en rive gauche (PK281.0 ; porte de détection à un seul hydrophone Fourques).....24

Figure 4 : Exemples de détecteurs déployés le long du Rhône : (A) au RCC_RD (PK218), relié à une alimentation autonome avec panneau solaire et batterie (armoire sous le panneau solaire). (B) à l'écluse, relié au réseau électrique 220 v de l'Usine de Caderousse. (C) Détail de l'intérieur d'une armoire de chantier dans le local du SNC avec le système de gestion de l'alimentation (rail d'en haut), le récepteur-enregistreur de données (ATDL, rail du milieu) et le modem (posé ici sur l'ATDL). Dans ce cas particulier nous avons un modem pour deux ATDLs (RCC_RG et Aval_Usine_RD) dans la même armoire (le second ATDL est visible en bas de l'armoire, juste au bout du montant gauche de l'échelle).....25

Figure 5 : Hydrophone omni-directionnel qui détecte les signaux à 330 degrés. La détection des son se fait par l'antenne plastifiée (en noir, à droite sur l'image).....26

Figure 6 : Câble permettant de relier l'hydrophone immergé et le récepteur-enregistreur de données (ATDL).....26

Figure 7 : Récepteur - enregistreur de données HTI © (ATDL) et récepteur relié à un hydrophone avec un câble.....27

Figure 8: Émetteurs (Tags) HTI Model 795 de type LZ (69 mm) à gauche et LY (48 mm) à droite – 16 mm de large - et respectivement 24 g et 12 g dans l'air. (<https://www.innovasea.com/fish-tracking/products/acoustic-transmitters/>).....29

Figure 9 : Détail des émissions acoustiques des marques (tags) HTI. Le signal (codé par HTI) est émis à intervalles réguliers (période) de l'ordre de 5.8 secondes dans cet exemple. Cette émission est répétée dans un intervalle fixe (subcode) pour faciliter la détection du signal. Avec le logiciel de post-traitement MarkTags il est facile de détecter les émissions acoustiques d'une marque en réglant l'échelle du temps (verticale) exactement égale à la période (en haut à droite). Pour le projet DAARAC les périodes d'émission acoustique sont de l'ordre de 3 secondes pour augmenter les chances de détection des émissions même si les anguilles se déplacent vite.....30

Figure 10 : Interface de l'enregistreur M395 qui permet de configurer l'enregistreur (fichier générés, gestion de l'heure par gps, type de signaux, gain).....30

Figure 11 : Visualisation avec MarkTags des enregistrement des émissions acoustiques d'un milieu avec un gain qui filtre trop (en haut à gauche), pas assez (en haut à droite) ou parfaitement (en bas) les bruits ambiants.....31

Figure 12 : Succession des différents types de fichiers au cours du post-traitement. Les fichiers bruts issus des cartes SD des enregistreurs (RAT) sont scannés pour isoler les émissions acoustiques des marques utilisées pour l'expérimentation (TAT) ce qui permet de connaître la présence d'une marque donnée dans le rayon de détection d'un hydrophone donné à une heure précise à la seconde.....32

Figure 13 : Résultat du test de détection à la porte de détection Usine (canal de fuite de l'usine de Caderousse - PK218). Les losanges rouges représentent les positions des hydrophones. A gauche (en orange), les détections de la marque déplacée par le canoë par l'hydrophone situé en rive droite, à droite les résultats des détections par l'hydrophone situé en rive gauche. La ligne pleine grisée est la trajectoire de la marque. Lorsque la ligne pleine grisée est visible, aucune émission sonore de la marque n'a été détectée.....35

Figure 14 : Résultat du test de détection simultanée au passage de Usine (Pk218) et de RCC (Pk218). En bleu, la détection de l'émission de la marque par l'hydrophone Usine_RG. En orange, la détection de de l'émission de la marque par l'hydrophone Usine_RD. En vert, la détection de l'émission de la marque par RCC_RD.....35

Figure 15 : vue en trois dimensions de la porte de détection Usine à l'aval de l'usine de Caderousse (Pk218) basé sur des profils bathymétriques opérés par la CNR (haut ; les points noirs sont les positions des hydrophones) et profil bathymétrique tracé entre les deux hydrophones (bas ; unités en m ; ordonnées = altitude NGF).....36

Figure 16 : vue en trois dimensions de la porte de détectionPK220 basée sur des profils bathymétriques opérés par la CNR (haut ; les points noirs sont les positions des hydrophones) et profil bathymétrique tracé entre les deux hydrophones (bas ; unités en m ; ordonnées = altitude NGF).....37

Figure 17 : Représentation graphique du fonctionnement des enregistreurs (une porte de détection, une rive, un hydrophone, un enregistreur) sur An#1, en haut le Déversoir (appelé ici Delestage et en bas Arles Rive Gauche. Enreg = un fichier RAT a été enregistré sur la carte SD de l'enregistreur; Beacon = il y a autant de lignes que d'hydrophone à la porte de détection avec la première ligne correspondant au beacon tag le plus proche de l'hydrophone étudié. Les gros points signifient > 5000 détections par jour (sur 5400 possibles pour une période de 16 sec) et les petits points signifient > 500 détections par jour. L'absence de point sur une ligne correspond à une absence de détection.(voir tous les résultats en Annexe).....41

Figure 18 : Schématisation du site d'échantillonnage sur le Rhône à l'amont de l'aménagement de Caderousse (Barrage situé au Pk213). Nous avons différencié deux origines de capture pour les anguilles argentées marquée : « Amont » pour une capture en amont du Pk170 et « Marquage » pour une capture entre les PK 172 et 211. Les traits rouges symbolise les linéaires de rives échantillonnés. Les chiffres sont les Points Kilométriques (PK). Les points noirs avec un nom sont les communes. Au Pk200.4 le point de remise à l'eau des anguilles argentées marquées est indiqué en bleu. La flèche bleue en haut indique le sens du courant. RCC = Rhône court-circuité ; CF = canal de fuite ; MO = Aménagement CNR de Montélimar ; DM = Aménagement CNR de Donzère Mondragon.....42

Figure 19: Relation taille – poids des anguilles marquées en 2018 (carrés noirs), 2019 (losanges rouges) et 2020 (triangles gris) pour le projet DAARAC à Mondragon (Vaucluse, 84). Un modèle Puissance est ajusté aux données pour chaque année (courbes). A noter que les limites de masse minimum pour l'implantation chirurgicale des balises HTI sont : LF > 150 g; LY > 600 g et LZ > 1200 g.....47

Figure 20 : Relation taille – poids de toutes les anguilles capturées dans le Rhône et dans les lagunes et étangs du Sud en 2013, 2018, 20019 et 2020 (n=467) et passées à la biométrie. Un modèle Puissance est ajusté aux données pour chaque jeu de données (courbes).....48

Figure 21 : Description des tailles et des masses des individus marqués ayant dévalés (carrés bleus) ou non (losanges oranges).....55

Figure 22 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des heures de la journée (entre 0h00 et 23h59) des détections des marques HTI des anguilles au Déversoir entre septembre 2018 et avril 2021. Les distributions sont présentées par année de marquage. Pour information, entre septembre et mars, la période de la journée dans laquelle fluctue le lever du soleil est de 7h00 à 8h44 et 16h56 à 20h30 pour le coucher du soleil.....56

Figure 23 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des heures de la journée (entre 0h00 et 23h59) des détections des marques HTI des anguilles ayant franchi l'aménagement CNR de Caderousse entre septembre 2018 et avril 2021. Les distributions sont présentées par année de marquage et par la position de l'hydrophone ayant détecté la marque (en rive Droite (bleu clair) ou Gauche (bleu sombre)). Pour information, entre septembre et mars, la période de la journée dans laquelle fluctue le lever du soleil est de 7h00 à 8h44 et 16h56 à 20h30 pour le coucher du soleil.....57

Figure 24 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des durées du trajet (en heure ; échelle Log10) des anguilles ayant franchi l'aménagement CNR de Caderousse entre sept 2018 et avril 2021, depuis la zone de marquage jusqu'à chaque porte de détection. L'heure de détection est, pour une porte donnée, celle de la première détection pour les deux hydrophones quand il y a un hydrophone sur chaque rive du Rhône (toutes les portes du graphique sauf Ecluse et Déversoire). Pour information : 24h = 1j ; 100 h = 4 j ; 1000 h = 42 j.....59

Figure 25 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des temps de trajet (en heure ; échelle Log10) entre porte de détection successives. Pour information : 24h = 1j ; 100 h = 4 j ; 1000 h = 42 j.....61

Figure 26 : Date de la première détection des anguilles argentées en dévalaison au cours de la première année du projet DAARAC (An1 : 20180501-20190430, n=24) situées sur la chronique de débit et de température du Rhône à Caderousse (noter que le premier marquage a débuté le 28/08/2018). Chroniques des débits moyens journaliers en amont de l'aménagement de Caderousse (à Chusclan, Pk 208, en rouge), dans le RCC (en gris). Noter l'échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées de gauche correspondant aux débits. Chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'Usine de Caderousse (en chartreuse; axe des ordonnées de droite). Les symboles noirs avec ligne verticale indiquent les passages par la route de l'usine et les symboles bleus avec ligne verticale indiquent les passages par la route du RCC. Les symboles noirs épais en ordonnées = 60 représentent les dates de marquage (28/08/2018 au 06/09/2018 et 09/11/2018). Les séries de ronds violets, bleus et gris au-delà de l'ordonnée = 5000 sont les résultats du Modèle Teichert et al. (2020) à savoir respectivement les classes de migration P95, P75 et P50 avec une probabilité > 0.5 de dévalaison des anguilles argentées pour atteindre 95 %, 75 % et 50 % (respectivement) des nombres annuels d'anguilles argentées modélisés en migration.....64

Figure 27 : Date de la première détection des anguilles argentées en dévalaison au cours de la deuxième année du projet DAARAC (An2 : 20190501-20200430, n=32) situées sur la chronique de débit et de température du Rhône à Caderousse (noter que le premier marquage a débuté le 26/08/2019). Chroniques des débits moyens journaliers en amont de l'aménagement de Caderousse (à Chusclan, Pk 208, en rouge), dans le RCC (en gris). Noter l'échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées de gauche correspondant aux débits. Chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'Usine de Caderousse (en chartreuse; axe des ordonnées de droite). Les symboles noirs avec ligne verticale indiquent les passages par la route de l'usine et les symboles bleus avec ligne verticale indiquent les

passages par la route du RCC. Les symboles noirs épais en ordonnées = 60 représentent les dates de marquage (26/08/2019 au 06/09/2019 et 06/11/2019). Les séries de ronds violets, bleus et gris au-delà de l'ordonnée = 5000 sont les résultats du Modèle Teichert et al. (2020) à savoir respectivement les classes de migration P95, P75 et P50 avec une probabilité > 0.5 de dévalaison des anguilles argentées pour atteindre 95 %, 75 % et 50 % (respectivement) des nombres annuels d'anguilles argentées modélisés en migration.....65

Figure 28 : Date de la première détection des anguilles argentées en dévalaison au cours de la troisième année du projet DAARAC (An3 : 20200501-20210430, n=17) situées sur la chronique de débit et de température du Rhône à Caderousse (noter que le premier marquage a débuté le 25/08/2020). Chroniques des débits moyens journaliers en amont de l'aménagement de Caderousse (à Chusclan, Pk 208, en rouge), dans le RCC (en gris). Noter l'échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées de gauche correspondant aux débits. Chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'Usine de Caderousse (en chartreuse; axe des ordonnées de droite). Les symboles noirs avec ligne verticale indiquent les passages par la route de l'usine et les symboles bleus avec ligne verticale indiquent les passages par la route du RCC. Les symboles noirs épais en ordonnées = 60 représentent les dates de marquage (25/08/2020 au 03/09/2020). Les séries de ronds violets, bleus et gris au-delà de l'ordonnée = 5000 sont les résultats du Modèle Teichert et al. (2020) à savoir respectivement les classes de migration P95, P75 et P50 avec une probabilité > 0.5 de dévalaison des anguilles argentées pour atteindre 95 %, 75 % et 50 % (respectivement) des nombres annuels d'anguilles argentées modélisés en migration.....66

Figure 29: Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la première année d'étude – An 1, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.....69

Figure 30 : Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la deuxième année d'étude – An 2, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.....70

Figure 31 : Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la troisième année d'étude – An 3, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.....71

Figure 32 : Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la quatrième année d'étude – An 4, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.....72

Figure 33 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la première année d'étude – An 1, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).....74

Figure 34 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la deuxième année d'étude – An 2, en noir. Chroniques des valeurs minimum

(Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).....75

Figure 35 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la troisième année d'étude – An 3, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).....76

Figure 36 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la quatrième année d'étude – An 4, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).....77

Figure 37 :Présentation de l'installation du matériel à bord du bateau pour les suivis mobiles. En haut vue du bateau avant le départ. La barre métallique en travers du bateau porte à bâbord et à tribord un support d'hydrophone qui est ici relevé pour la navigation et qui sera plus tard immergé. Chaque hydrophone est relié par un câble à un enregistreur qui peut être paramétré directement sur le bateau (bas ; pendant un suivi de nuit).....78

Figure 38: Hydrophone directionnel qui détecte les signaux à 30 degrés utilisés lors des suivis mobiles opérés en bateau.....79

Figure 39 : Exemple de résultat pour un suivi mobile. Projection sur un fond de carte Open Street Map (OSM) des détections des anguilles marquées représentées par des points de couleur. Chaque anguille est identifiée par sa période (4 chiffres, en msec) et son subcode (2 chiffres, en msec) séparés par un point. Le trait violet correspond à la trace du bateau lors du suivi mobile. L'ensemble des cartographies issues du post traitement des données enregistrées lors des prospections mobiles (amont et aval, de jour et amont de nuit) sont présentées en Annexes. Les cartographies pour les prospections de nuit à l'aval étant très comparables aux cartographie de jour, seules ces dernières sont présentées.....81

Figure 40: Nombre d'individus contactés par mobile à l'amont (de jour et de nuit) de l'aménagement de Caderousse en fonction de la date du suivi mobile. Les barres verticales noires représentent les fins d'années "biologiques". En rouge (fin été) et vert (novembre) sont présentées les dates de marquage de 2018 (n=84 ind.), 2019 (n=91 ind.) et 2020 (n= 59 ind.). Les dates sont données en mois, jour, année.. .83

Figure 41 : Distribution du nombre de contacts par anguille marquée contactée au cours des suivis mobiles de jour effectués à l'amont (autour de la zone de marquage) sur les quatre années d'étude (An1, n=3 suivis ; An2, n=4 suivis ; An3, n=6 suivis et An4, n=4 suivis).....83

Figure 42: Cartographie simplifiée de l'emprise prospectée en mobile autour de la zone de marquage (pointe de la presqu'île de la restitution, entre les Pks 200 et 201). Sur cette cartographie sont présentés les contacts de l'individu 3006_02 au cours des n=7 prospections pour lesquelles cette anguille a été contactée. Cet individu est considéré comme « immobile ». Les Pks sont les point kilométriques le long du Rhône (RCC et chenaux). L'ensemble des cartographies pour tous les individus contactés sont disponibles en Annexe.....86

Figure 43: Cartographie simplifiée de l'emprise prospectée en mobile autour de la zone de marquage (pointe de la presqu'île de la restitution, entre les Pks 200 et 201). Sur cette cartographie sont présentés les contacts de l'individu 3565_15 au cours des n=10 prospections pour lesquelles cette anguille a été contactée. Cet individu est considéré comme « mobile ». Les Pk sont les point kilométriques le long du

<i>Rhône (RCC et chenaux). L'ensemble des cartographies pour tous les individus contactés sont disponibles en Annexe.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 44 : Représentation synthétique des résultats du projet DAARAC. Les nombres sont des effectifs d'anguilles en phase d'argenture marquées et suivies au cours des quatre années du projet (2018 – 2022).....</i>	<i>91</i>
<i>Figure 45 : Estimation de la tendance commune pour l'abondance d'anguilles jaunes entre 2000 et 2021 (from Ices 2022 - Scientific Reports VOL 4(62)).....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 46 : Figures issues de l'Avis du comité scientifique (INRAE, CNRS, MNHN, OFB) à propos des « Estimations des possibilités de captures totales d'anguilles de moins de 12 cm pour la saison 2023 - 2024 » – (Boulangier et al., 2023). Le modèle d'estimation du recrutement utilisé ici (bas) est le plus optimiste des deux modèles utilisés par le comité scientifique.....</i>	<i>101</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nombre d'émissions sonores de la marque (période de 3055 msec) déplacées avec le canoë et pourcentage de détection de ces émissions par chaque hydrophone des portes de détection.....34

Tableau 2 : Pourcentage de temps de fonctionnement jugé bon (enregistrement de fichiers exploitables avec une limite de taille de fichier fixée à 4 Mo ; au-delà de 4 Mo cela signifie qu'il y avait beaucoup trop de bruit ambiant pour détecter une marque) par détecteur (enregistreur des sons détectés par un hydrophone) par année d'étude entre début septembre et fin février. A noter que pour Arles_RG deux hydrophones étaient immergés pour les deux dernières années d'étude en vue d'assurer une très bonne surveillance des dévalaisons.....40

Tableau 3 : Descriptif des effectifs marqués, de la longueur totale et de la masse moyennes des anguilles marquées pour le projet DAARAC en 2018, 2019 et 2020 par grand secteur de pêche (zone de Marquage = RCC et Canal de fuite de DM et retenue de Caderousse; zone Amont = autour de Viviers; Sud = sud du bassin du Rhône en bordure de Méditerranée - étangs pêcheur pro JLF) et par stade d'argenteure (FII à FV pour les femelles argentées et MD pour les mâles argentés ; Durif et al., 2005).....46

Tableau 4 : Coefficients de l'équation de la relation taille – poids des anguilles capturées dans le Rhône et dans les lagunes - étangs du Sud en 2013, 2018, 2019 et 2020. Les effectifs et les coefficients A et B sont donnés par année*secteur de pêche et pour la globalité des anguilles présentées à la biométrie lors du projet DAARAC. (L'équation est de forme $Y = A * X^B$).....48

Tableau 5 : Synthèse des effectifs d'anguilles argentées détectées lors du franchissement de l'aménagement de Caderousse (CNR) sur le Rhône, sur les trois années de suivi (2018-2021). Les résultats sont présentés par année de suivi (An #1, 2 et 3), par voie de passage à travers l'aménagement (RCC ou Usine) par stade d'argenteure (selon Durif et al., 2005) et par origine de capture.....52

Tableau 6 : Valeurs Min, Médiane, troisième quartile, Max et effectif des durées (en heures, et en jours pour les valeurs Max) entre le marquage et les différentes portes de détection pour les individus ayant dévalé.....59

Tableau 7: Nombres d'anguilles marquées ayant dévalé dans les 24 h, 72 h et 240 h (10 j) après leur remise à l'eau, présentés par année de marquage et par voie de passage. Les données sont issues des détections au Déversoir, Usine, RCC et Pk220. Les chiffres entre parenthèse représentent les individus marqués en novembre. Attention parmi les n=3 individus Usine – 72 h, n=1 n'a pas un passage vérifiable par l'usine, mais a été détecté au Déversoir dans les 72 h après son marquage.....59

Tableau 8 : Résumé des distributions des durées (en heure) et des vitesses (en $m s^{-1}$) des déplacements des anguilles argentées marquées en 2018, 2019 et 2020 à Mondragon (Vaucluse, 84) dans le Rhône. Les déplacements sont enregistrés entre des portes de détection du Déversoir (amont du mur du Barrage-Usine de Caderousse) et Usine, entre Usine ou RCC et Pk220 et entre Pk220 et Arles (Grand Rhône). Attention toutes les anguilles ne sont pas détectées à toutes les portes de détection.....60

Tableau 9: Synthèse des suivis mobiles effectués sur l'ensemble du projet. Amont = secteur autour de la zone de remise à l'eau des anguilles marquées (amont de l'aménagement de Caderousse). Aval = aval de l'aménagement de Caderousse.....80

RÉSUMÉ

L'objectif de l'étude présentée ici était de mieux connaître/comprendre le cheminement des anguilles argentées en phase de dévalaison au travers de l'aménagement hydro-électrique de Caderousse ainsi que la répartition des individus entre les deux bras du delta de Camargue (Grand Rhône / Petit Rhône). L'approche mise en œuvre repose sur 4 actions : (1) capturer et marquer (implantation chirurgicale d'un émetteur acoustique) des anguilles, préalablement identifiées comme argentées (stade Durif \geq III) en amont de l'aménagement de Caderousse (Pk214.0), (2) relâcher les individus marqués au centre de la zone de capture (Pk200.5) (3) enregistrer leur passage dans les voies de dévalaison possibles à travers l'aménagement hydroélectrique (écluse, barrage et Rhône court-circuité ou usine et canal de fuite) et (4) savoir si les individus dévalant qui arrivent en amont de la diffluence utilisent soit le Petit Rhône (Fourques- PK281.0) soit le Grand Rhône (Arles -Pk282.5) ; proxy d'une arrivée en mer Méditerranée par l'un des deux bras du delta).

Pour ce faire des portes de détection composées d'un hydrophone installé sur chaque rive du Rhône permettant de détecter les émissions sonores des marques, ont été installées sur le linéaire des différentes routes de dévalaison possibles ainsi qu'en Arles et à Fourques. A noter qu'après l'aménagement de Caderousse, deux autres aménagements doivent être franchis par les anguilles avant d'arriver en Arles, l'aménagement d'Avignon (Pk233.0) et l'Aménagement de Beaucaire (Pk263.0). Les portes de détection (Pk218.0, Pk220.0 et Pk282.5) sont des passages « obligés » pour les anguilles marquées ayant entamé une dévalaison. Des tests de la qualité d'écoute des portes de détection ont montré qu'il est peu probable de ne pas entendre une marque passer par la porte. Pour mieux évaluer le comportement des anguilles entre le marquage et leur dévalaison, des campagnes de suivi mobile (télémetrie active) sont organisées pour tenter de localiser les individus marqués n'ayant pas encore dévalé.

Un total de $n=234$ anguilles ont été marquées (masse minimum = 600 g). $N=79$ anguilles ont été détectées en dévalaison, principalement la nuit. La majorité des anguilles marquées qui franchissent l'aménagement de Caderousse, $n=59$ utilisent la route de l'usine et $n=14$ la route du RCC. $N=4$ anguilles ont été détectées juste en amont du barrage uniquement et $n=2$ anguilles ont été détectées en aval de l'aménagement lors des suivis mobiles. Aucune anguille n'a été détectée dans le Petit Rhône (Fourques). Seulement $n=18$ anguilles sont arrivées en Arles (Grand Rhône) et 14% des anguilles détectées à l'aval de l'aménagement (Pk218) n'arrivent pas au Pk220. Un effet marquage était observé avec 7% des individus marqués qui ont dévalé au cours des 72 h après leur remise à l'eau. Les anguilles dévalaient en se déplaçant assez vite (1 à 3 m s⁻¹ sur deux km) et 2/3 de celles qui arrivent en Arles ont mis moins de 45h (0.4 m s⁻¹) pour parcourir 62 km dont deux aménagements. Une augmentation forte de débit et une baisse rapide de la température de l'eau semblent être un couple de facteurs environnementaux très influent.

$N=21$ prospections mobiles ont été effectuées à l'amont et $n=8$ à l'aval. $N=102$ individus marqués ont été détectés au moins une fois au cours d'un suivi mobile et $n=64$ n'ont jamais été contactés. Le nombre total d'individus par mobile à l'amont a varié de 8 à 32 ind. avec une moyenne de 21.3 ind. par prospection. Très peu d'individus ont été contactés à l'aval (entre $n=2$ et $n=4$ par prospection). Le nombre total de contacts par individu à l'amont varie de 1 à 16 (moyenne = 4.12 contacts par individu). $N=36$ individus n'ont été contactés qu'une seule fois, $n=8$ individus ont été contactés dix fois ou plus au total lors des prospections à l'amont. Par année de suivi, plus de 50 % des individus détectés en prospection de jour, l'ont été une ou deux fois au maximum et plus de 80 % l'ont été trois fois au maximum. Même si le nombre de prospections de jour a varié de 3 à 6 par année de suivi, tous les individus présents ne sont pas toujours contactés. $N=68$ individus ont été contactés au moins deux fois de suite et $n=42$ ont bougé de moins de 200 m en moyenne entre deux contacts. Les distances moyennes (resp. maximum) individuelles entre deux contacts varient de 0.04 km à 3.50 km (resp. 0.04 km à 6.64 km). Parmi les $n=26$ individus qui se sont beaucoup déplacé, $n=16$ individus ont réalisé de petits déplacements (< 550m) et $n=11$ individus ont réalisé au moins un grand déplacement de plus de 1.2 km.

L'équipe opérationnelle de l'étude était constituée par des personnels d'INRAE, renforcés par des personnels de CNR, MRM, OFB, Fédérations de pêche locales et des pêcheurs professionnels.

Mots clefs

Anguilles, Dévalaison, Aménagement hydroélectrique, Rhône, Télémétrie acoustique

ABSTRACT

Determining the downstream migration routes of silver eels through a run-of-river hydroelectric scheme on the lower Rhône River (France)

The aim of the study presented here was to gain a better knowledge/understanding of silver eels during their downstream migration through the Caderousse hydroelectric scheme, as well as the distribution of individuals between the two arms of the Camargue delta (Grand Rhône / Petit Rhône). The approach implemented is based on 4 actions: (1) capture and marking (surgical implantation of an acoustic transmitter) of eels, identified as silver eels (Durif \geq III stage) upstream of the Caderousse scheme (Pk214.0), (2) release the marked eels in the center of the capture zone (Pk200.5) (3) record their passage through possible downstream passageways through the hydroelectric scheme (lock, dam and short-circuited or plant and tailrace) and (4) find out whether the downstream individuals arriving upstream of the confluence use either the Petit Rhône (Fourques- Pk281.0) or the Grand Rhône (Arles-Pk282.5); a proxy for arrival at the Mediterranean Sea via the Camargue delta.

To this end, detection gates consisting of a hydrophone installed on each bank of the Rhône to detect the sound emissions of the marks were installed along the various possible downstream routes, as well as in Arles and Fourques. It should be noted that after the Caderousse scheme, two other schemes must be crossed by the eels before arriving in Arles: Avignon (Pk233.0) and Beaucaire (Pk263.0). The detection gates (Pk218.0, Pk220.0 and Pk282.5) are "obligatory" passages for marked eels that have begun their downstream migration. Tests of the listening quality of the detection gates have shown that it is unlikely not to hear a mark passing through the gate. To better assess the behavior of eels between marking and downstream migration, mobile tracking campaigns (active telemetry) are organized to try to locate marked individuals that have not yet downstreamed.

A total of $n=234$ eels were tagged (minimum mass = 600 g). $N=79$ eels were detected on their way downstream, mainly at night. The majority of tagged eels crossing the Caderousse development, $n=59$ used the road of power plant and $n=14$ the RCC road. $N=4$ eels were detected just upstream of the dam only, and $n=2$ eels were only detected downstream of the scheme. No eels were detected in the Petit Rhône (Fourques). Only $n=18$ eels arrived in Arles (Grand Rhône), and 14% of eels detected downstream of the dam (Pk218) did not arrive at Pk220. A marking effect was observed, with 7% of marked individuals starting their migration within 72 h of being released. The eels moved downstream fairly quickly (1 to 3 m s⁻¹ over two km) and 2/3 of those arriving at Arles took less than 45 h (0.4 m s⁻¹) to cover 62 km, including two schemes. A sharp increase in flow and a rapid drop in water temperature seem to be a highly influential pair of environmental factors.

$N=21$ mobile surveys were carried out upstream and $n=8$ downstream. $N=102$ marked individuals were detected at least once during a mobile survey and $n=64$ were never contacted. The total number of individuals per mobile upstream varied from 8 to 32, with an average of 21.3 per survey. Very few individuals were contacted downstream (between $n=2$ and $n=4$ per survey). The total number of contacts per individual upstream varied from 1 to 16 (mean = 4.12 contacts per individual). $N=36$ individuals were contacted only once, $n=8$ individuals were contacted ten or more times in total during upstream surveys. For each year of monitoring, more than 50% of the individuals detected during daytime surveys were detected once or twice at most, and more than 80% were detected three times at most. Although the number of daytime surveys varied from 3 to 6 per monitoring year, not all individuals present were always contacted. $N=68$ individuals were contacted at least twice in succession, and $n=42$ moved less than 200 m on average between two contacts. The average (resp. maximum) individual distances between two contacts varied from 0.04 km to 3.50 km (resp. 0.04 km to 6.64 km). Of the $n=26$ individuals that

moved a lot, n=16 individuals made short trips (< 550m) and n=11 individuals made at least one long trip of over 1.2 km.

The study's operational team was made up of INRAE staff, reinforced by personnel from CNR, MRM, OFB, local fishing federations and professional fishermen.

Keywords

European Eel, Downstream migration, Hydroelectric scheme, Rhône River, Acoustic telemetry

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement le personnel de l'usine CNR de Caderousse pour sa disponibilité et sa compréhension. Merci aux entreprises Sabatier (travaux publics) et EIV (électriciens) pour leur patience et leur flexibilité. Un grand merci à la Société Nautique de Caderousse (en particulier Michel Condomines) pour sa confiance et sa disponibilité et pour l'hébergement de notre matériel. Un grand merci aussi aux agents OFB (69, 84, 30) qui ont participé aux pêches électriques encadrées par Pascal Roche. Un merci tout particulier pour nos pêcheurs professionnels Florestan Giroud (pour son aide indéfectible pour les semaines de pêche et marquage) et Jean-Luc Fontaine (pour sa patience, son expérience et ses verveux). Enfin merci à nos collaborateurs pour cette étude : MRM (particulièrement Damien Rivoalan, Pierre Campton, Fanny Alix et Charlie Perrier), CNR (particulièrement Franck Pressiat, Lionel Méric, Christophe Mora, Mathieu Rocle, Nicolas Thevenet, William Brasier et Frédéric Laplace) et INRAE (particulièrement Raphaël Mons, Claire Rambeau, Guillaume Le Goff et Abdelkader Azougui).

PRESENTATIONS DU PROJET AU PUBLIC

Ce travail, à différentes étapes, à été présenté en communication orale lors des colloques :

- Journées MRM, 2017, Avignon
- Journées MRM, 2021, Avignon
- Journées Télémétrie, 2022, Bordeaux
- 8 ème Rencontres de l'Ichtyologie en France, 2022, Paris
- Fish Passage, 2024, Québec

INTRODUCTION

La connectivité entre les habitats d'eau douce et les zones marines est fortement obstruée par des aménagements anthropiques (par exemple, des barrages, des stations de pompage, des écluses...), ce qui entraîne une forte pression sur les populations de poissons diadromes. Une meilleure compréhension du comportement migratoire des poissons par rapport à ces barrières est nécessaire pour prendre des mesures d'atténuation appropriées (Verhelst et al., 2018). Des retards importants et un comportement exploratoire à proximité des barrières ont été observés par exemple pour le saumon atlantique (Nyqvist et al., 2017) ou encore l'anguille européenne (Verhelst et al., 2018).

L'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) est une espèce de poisson catadrome dont le cycle biologique est complexe et qui comprend des migrations à travers l'océan Atlantique (Aarestrup et al., 2009) vers et depuis des frayères qui seraient situées dans la mer des Sargasses. Les larves écloses, ou leptocéphales, sont transportées de l'autre côté de l'océan Atlantique avec les courants océaniques. Lorsqu'elles atteignent l'Europe, elles sont devenues des anguilles de verre et, après s'être établies, elles deviennent des civelles pigmentées. Certaines de ces anguilles juvéniles pénètrent dans les rivières et les lacs, tandis que d'autres demeurent dans les eaux côtières tout au long de leur vie ou se déplacent entre l'eau douce et la mer. Le stade de développement suivant est le stade jaune, au cours duquel se produit la majeure partie de la croissance du corps. Après quelques années, jusqu'à plus de 20 ans, les anguilles jaunes se transforment en anguilles argentées, adaptation physiologique et morphologique au voyage transatlantique à venir (Durif et al., 2005 ; Durif et al., 2020).

La population d'anguilles européennes est gravement menacée en raison d'une multitude de facteurs d'origine humaine tels que la fragmentation de l'habitat, les parasites, la pêche et le changement climatique. En eau douce, les retards peuvent avoir un impact sévère sur les anguilles car leurs ressources énergétiques sont limitées et dimensionnées pour une migration transatlantique réussie (Acou et al., 2008). Les retards et le comportement exploratoire peuvent également augmenter le risque de prédation et de maladie. Les anguilles argentées migrant vers l'aval rencontrant des centrales hydroélectriques subissent aussi une mortalité accrue en raison des grilles et des turbines (Calles et al., 2021). Un titre assez évocateur de Science et Avenir du 14/12/2021 résume de manière percutante la réalité de la situation : "70 millions d'années d'existence et 40 ans de déclin" : l'anguille menacée par l'homme.

L'Anguille européenne est classée depuis 2008 comme espèce en danger critique d'extinction (liste rouge, UICN, juillet 2019 ; <https://uicn.fr/>). L'Union européenne a pris des mesures de protection par le règlement CE n° 1100/2007 du 18 septembre 2007. Ce règlement européen pour la reconstitution du stock d'anguille vise à atteindre un taux d'échappement de géniteurs équivalent à 40% de la biomasse qu'il y aurait sans pression anthropique. La France a répondu à l'objectif européen en adoptant un plan de gestion de l'Anguille européenne (PGA) pour la reconstitution des stocks en fort déclin, basé principalement sur une réduction de la mortalité anthropique des anguilles.

Le PGA prévoit d'agir sur l'ensemble des causes de mortalités et fixe des objectifs ambitieux pour une réduction (1) de la mortalité par pêche de l'anguille de moins de 12 cm, de l'anguille jaune et de l'anguille argentée et (2) de la mortalité liée aux autres causes anthropiques, dont les aménagements hydroélectriques (PGA de la France - Rapport de mise en œuvre - juin 2015).

Un Comité National Anguille a été mis en place, ainsi que plusieurs groupes de travail thématiques. Le groupe de travail "Ouvrages" a initié un programme de Recherche et de Développement visant à optimiser la conception et la gestion des ouvrages dans une optique de protection de l'anguille en tant que poisson migrateur. Les trois objectifs sont : 1) comprendre le comportement de l'anguille lors de ses migrations anadrome (montaison) et catadrome (dévalaison vers la mer) au droit des ouvrages transversaux; 2) évaluer l'impact des ouvrages vis-à-vis de la migration de l'anguille et 3) tester des solutions technologiques permettant de limiter les impacts des ouvrages.

Plus localement le Plan de Gestion des Poissons Migrateurs (PLAGEPOMI 2016 – 2021, approuvé en novembre 2016) du bassin Rhône-Méditerranée fait le lien entre les politiques nationales de gestion des poissons migrateurs amphihalins et des milieux aquatiques (PGA, Plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau – PARCE, schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eau – SDAGE, schémas régionaux de cohérence écologique...). Dans son orientation 4 (améliorer la connaissance sur les espèces et leurs habitats), le PLAGEPOMI donne une priorité A (Prioritaire : *Absence de connaissance ou connaissance trop partielle pour agir, actions nécessitant d'être complétées pour en tirer des conclusions opérationnelles*) au besoin de connaissances quant à la dévalaison de l'anguille argentée dans le fleuve Rhône (page 72, Tableau 8), notamment pour mieux évaluer les routes de dévalaison autour des aménagements hydroélectriques. Le PLAGEPOMI Rhône-Méditerranée s'est fixé des objectifs de reconquête des axes de migration et de non dégradation de la situation sur l'ensemble du bassin, avec un objectif de restauration de la continuité piscicole fixée, sur l'axe Rhône, en aval de la confluence avec la Drôme.

C'est dans ce cadre que la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) essaie de mieux appréhender l'incidence globale d'un aménagement du Rhône sur la dévalaison des anguilles argentées. Pour ce faire, deux axes de recherche ont été définis. Le premier axe porte sur la survie des anguilles lors du passage dans une turbine de grande taille (CNR-Normandeau, 2011 ; Heisey et al., 2019). Le second axe est dédié à la détermination des principales routes de dévalaison des anguilles argentées au niveau de l'aménagement. C'est pour répondre à cette seconde interrogation qu'une expérimentation a été menée sur l'aménagement CNR de Caderousse (situé dans la Zone d'Action Prioritaire pour l'anguille, PLAGEPOMI – page 37-carte 6). De configuration standard, cet aménagement offre deux routes principales de dévalaison (Figure 1) : le vieux Rhône à l'aval du barrage de dérivation (tronçon court-circuité avec un débit réservé de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ avant le 1^{er} janvier 2014 et $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ depuis) et le canal de dérivation qui conduit à l'usine hydroélectrique (fonctionnement au fil de l'eau). Au niveau du barrage de dérivation, les anguilles peuvent passer par les vannes à clapet. Du côté de l'usine, elles peuvent passer par les turbines, par l'écluse de navigation ou éventuellement par le déversoir quand il est utilisé. Cette dernière possibilité semble moins probable du fait de son fonctionnement par sur-verse, donc en surface.

La présente étude fait suite à un test in situ réalisé pour analyser la faisabilité technique d'utiliser un équipement de télémétrie acoustique (développé par la société HTI ; <http://www.htisonar.com/> devenue Innovasea (<https://www.innovasea.com>) après sa fusion avec Vemco) pour déterminer les routes de dévalaison privilégiées par les anguilles argentées à Caderousse. Le système acoustique HTI a déjà été déployé dans le Rhône à hauteur de Bugey par Irstea, devenu INRAE, et s'est révélé très performant (Pella et al., 2011 ; Bergé et al., 2012), notamment dans les environnements bruyants, grâce à sa très haute fréquence (307 KHz). L'objet de la collaboration CNR – IRSTEA en 2013-2014 était d'organiser un test de faisabilité technique (test 1 - « technique ») et un test d'enregistrement réel de la dévalaison de

quelques dizaines d'anguilles marquées en amont du barrage de Caderousse (test 2 – « conditions réelles») pour déterminer les conditions de mise en œuvre d'un suivi sur une durée significative (plusieurs années) qui est l'objet de la présente étude. Les recommandations principales des tests de 2013-2014 étaient :

- de marquer des anguilles argentées (au stade Durif le plus avancé possible) capturées le plus en amont possible de l'aménagement ; les individus marqués doivent être remis à l'eau le plus proche possible de leur lieu de capture ; les marques utilisées auront la plus grande durée de vie possible (en essayant de conserver une émission sonore toutes les 3 secondes) ;
- de prévoir des captures le plus tôt possible (fin août) pour éviter une dévalaison possible dès les premières crues d'automne sur le Rhône ;
- d'envisager une pêche professionnelle avec des verveux, mais couplée à la pêche électrique du fait d'une efficacité très variable des verveux ;
- prévoir des systèmes d'enregistrement acoustiques autonomes en énergie électrique et sécurisés.

L'OFB en la personne de Pascal Roche (et tous ses collègues), MRM (Damien Rivoallan, Pierre Campton, Charlie Perrier, Fanny Alix), les pêcheurs professionnels Florestan Giroud et Jean-Luc Fontaine et les fédérations de pêche Ardèche et Vaucluse ont grandement participé à la réalisation de cette étude.

Le présent rapport rend compte de l'étude dont les principaux défis étaient des (1) capturer et marquer (implantation chirurgicale d'une marque émettrice) des anguilles, préalablement identifiées comme en cours d'argenture ou argentées (Stade Durif1 \geq III ; Durif et al., 2009) en amont de l'aménagement de Caderousse (PK214.0), (2) relâcher les individus marqués au centre de la zone de capture (3) d'enregistrer le passage des anguilles marquées qui dévalent via une des routes de dévalaison possibles à travers l'aménagement hydroélectrique (écluse, déversoir, barrage - Rhône court-circuité (RCC) ou usine - canal de fuite) et (4) savoir si les individus dévalant qui arrivent en amont de la diffluence utilisent soit le Petit Rhône (Fourques- PK281.0) soit le Grand Rhône (Arles -Pk282.5), proxy d'une arrivée en mer Méditerranée par l'un des deux bras du delta, 69 km en aval de l'Usine CNR de Caderousse. A noter qu'après l'aménagement de Caderousse, deux autres aménagements doivent être franchis par les anguilles avant d'arriver en Arles, l'aménagement d'Avignon (PK233.0) et l'Aménagement de Beaucaire (PK263.0). Les portes de détection sont des passages « obligés » pour les anguilles ayant entamé une dévalaison au niveau desquelles ont été installés un ou deux détecteurs (hydrophone qui détecte les émissions sonores des marques implantées dans les anguilles) et l'équipement qui permet de les alimenter en électricité, d'enregistrer les données et de télétransmettre ces données. Pour mieux évaluer le comportement des anguilles entre le marquage et leur dévalaison, des campagnes de suivi mobile (détection des marques par déplacement en bateau) sont organisées pour tenter de localiser les individus marqués n'ayant pas encore dévalé.

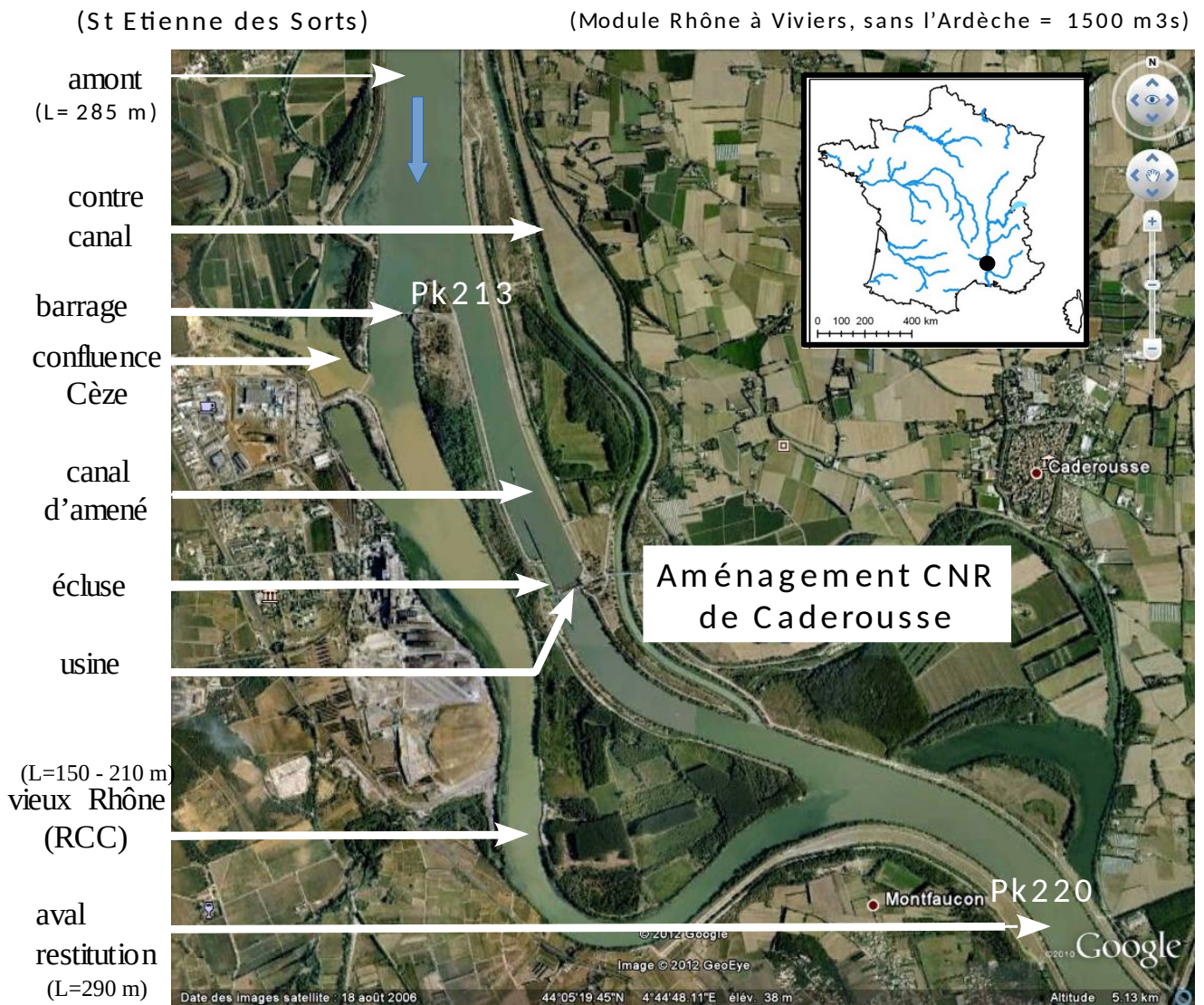


Figure 1 : vue générale de l'aménagement CNR de Caderousse (Google Earth – 2002).



Figure 2 : Localisation précise des hydrophones des portes de détection autour de l'aménagement CNR de Caderousse. Les différentes routes de dévalaison possibles sont : le Vieux Rhône – RCC (détection à la porte RCC (Pk 218.0, deux hydrophones) puis à la porte PK220 (deux hydrophones) ; L'écluse (détection à la porte Ecluse – porte de détection à un seul hydrophone (Pk 214.7) puis à la porte PK220) et l'Usine (détection à la porte Usine (Pk 218.0, deux hydrophones) puis à la porte PK220 ; un passage par le Deversoir, lorsqu'il est utilisé, est possible mais non détectable de manière certaine)

Localisation des installations en Arles

sur le Grand Rhône, aval Pont de Trinquetaille



sur le Petit Rhône, amont vieux pont de Fourques

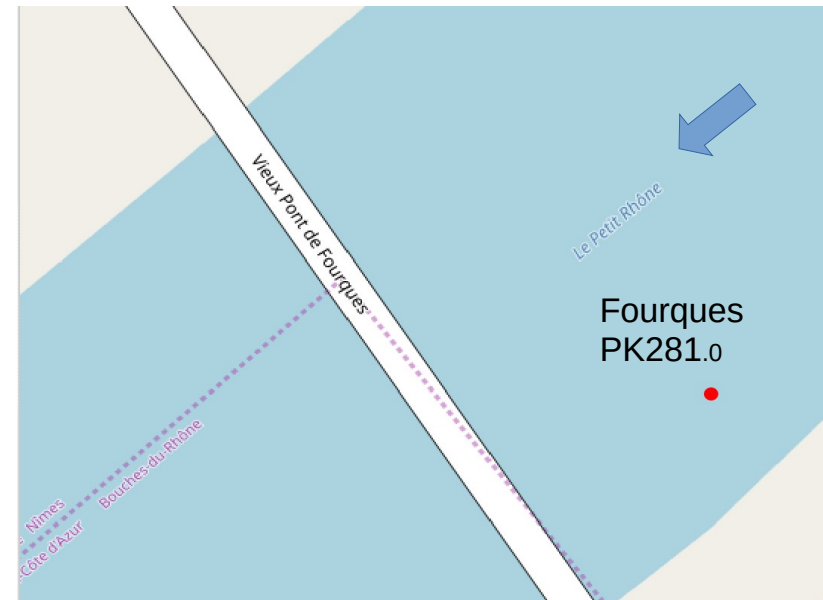


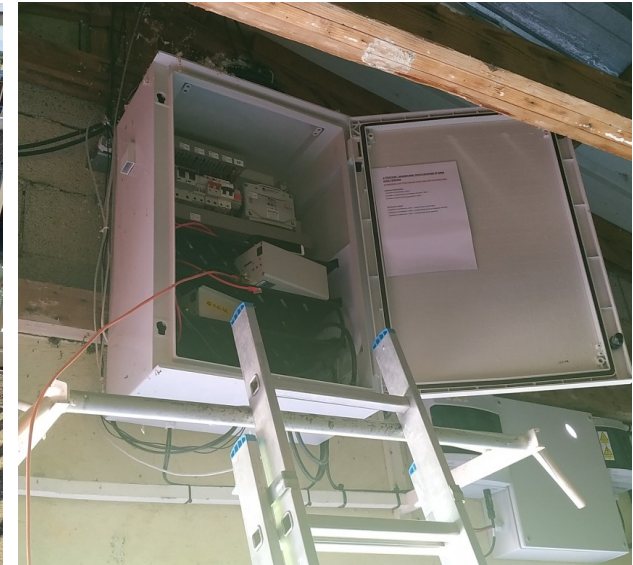
Figure 3 : Localisation précise des hydrophones des portes de détection en Arles, dans le Grand Rhône (en aval du Pont de Trinquetaille ; à Gauche) avec la porte de détection à deux hydrophones Arles (Pk282.6) et dans le Petit Rhône, à l'amont du Vieux pont de Fourques, en rive gauche (PK281.0 ; porte de détection à un seul hydrophone Fourques).



(A)



(B)



(C)

Figure 4 : Exemples de détecteurs déployés le long du Rhône : (A) au RCC_RD (PK218), relié à une alimentation autonome avec panneau solaire et batterie (armoire sous le panneau solaire). (B) à l'écluse, relié au réseau électrique 220 v de l'Usine de Caderousse. (C) Détail de l'intérieur d'une armoire de chantier dans le local du SNC avec le système de gestion de l'alimentation (rail d'en haut), le récepteur-enregistreur de données (ATDL, rail du milieu) et le modem (posé ici sur l'ATDL). Dans ce cas particulier nous avons un modem pour deux ATDLs (RCC_RG et Aval_Usine_RD) dans la même armoire (le second ATDL est visible en bas de l'armoire, juste au bout du montant gauche de l'échelle).

DÉPLOIEMENT DU MATÉRIEL

Nous avons installé 11 détecteurs le long du secteur étudié, huit à hauteur de l'aménagement de Caderousse et trois en Arles (Figure 2 et Figure 3).

Les détecteurs

Un détecteur est composé de quatre éléments principaux déployés sur le terrain :

- un hydrophone HTI © omni-directionnel (Model 590-series ; Figure 5) immergé dans au moins 50 cm d'eau, tête enregistreuse orientée vers le haut. L'hydrophone détecte tous les signaux sonores dans une gamme de fréquence proche de 307 kHz dans son volume d'écoute à 330° et les transforme en signaux électriques. L'hydrophone est fixé à une structure métallique conçue spécifiquement pour l'expérimentation (porte hydrophone) fixées solidement à un support déjà présent dans l'eau (exemple limnigraphe CNR de Fourques – petit Rhône) ou installé pour l'expérimentation (exemple IPN planté dans le fond du Rhône par battage – PK220).

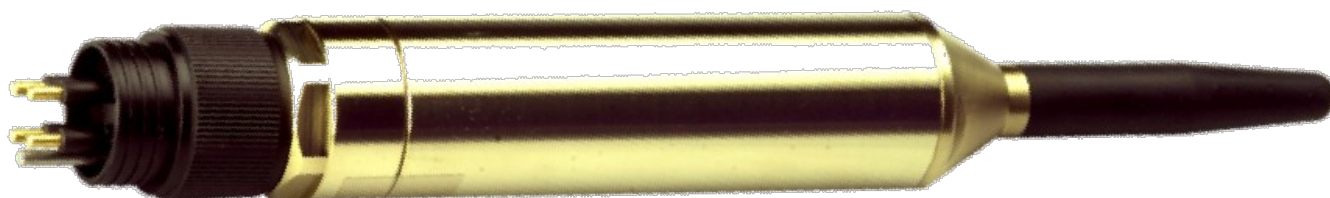


Figure 5 : Hydrophone omni-directionnel qui détecte les signaux à 330 degrés. La détection des son se fait par l'antenne plastifiée (en noir, à droite sur l'image)

- un câble HTI © qui transporte les signaux électriques créés par l'hydrophone vers le récepteur (Figure 6).

> 690-Series Hydrophone Cables

HTI's 690-series Hydrophone Cables and 696 Armored Hydrophone Cables were designed to handle rugged aquatic environments. Compared to other cables, they allow significantly less noise from outside electrical sources. These cables are excellent for long term, deep water operations.



Figure 6 : Câble permettant de relier l'hydrophone immergé et le récepteur-enregistreur de données (ATDL).

- un récepteur - enregistreur de données HTI © (ATDL) alimenté en électricité et dont le fonctionnement est géré par un Windows CE embarqué (Figure 7). Les données sont stockées dans l'ATDL sur une carte

SD. Chaque récepteur enregistre en permanence les fréquences des signaux sonores détectés par l'hydrophone et l'heure de détection à la milliseconde, obtenue par une antenne GPS reliée à l'ATDL.

- un modem (lui même alimenté en électricité) équipé d'une clé 3G permet de télétransmettre les données à INRAE Lyon chaque jour.

(Cf. des illustrations de ces équipements en Annexe).

MODEL 395 ACOUSTIC TAG DATA LOGGER



Designed for mobile acoustic tag surveys, the *Model 395 Micro Data Logger* detects the presence/absence of tagged fish in one simple application. Using an omni-directional or direction hydrophone, it works together with HTI's *MobileTag* software to simultaneously detect and identify tagged fish in real-time along with recording the boat's GPS positions in mobile surveys.

The *Model 395* is HTI's smallest data logger at 0.68 kg (1.5 lb) and comes with 2 GB of internal data storage.



Figure 7 : Récepteur - enregistreur de données HTI © (ATDL) et récepteur relié à un hydrophone avec un câble.

Les câbles sont protégés dans des fourreaux enfouis dans la berge. Les ATDLs et les modems sont placés dans des armoires électriques de chantier étanches. Dans cette armoire ce trouve aussi l'alimentation électrique (pour l'ATDL et le modem) issue du réseau électrique 220 v ou d'une batterie alimentée par un panneau solaire ou par le réseau électrique 220 v quand celui-ci n'est pas très stable (ex Arles).

Une porte de détection est une section virtuelle en travers du Rhône couverte entièrement par un ou deux hydrophones. Une porte de détection sera constituée de deux détecteurs face à face (un sur chaque berge du Rhône par exemple) lorsque la largeur du cours d'eau à surveiller est > 100 m, sinon un seul détecteur

suffit. L'objectif était de se placer dans les zones le moins larges possible, pas trop isolées et si possible avec une alimentation électrique 220 v proche.

Différentes configuration d'installation ont été adoptées :

Quatre portes de détections avec deux détecteurs (hydrophones) ont été installées (Rive Droite (RD) et Rive Gauche (RG) :

- Usine : au PK218.0, dans le canal de fuite, en aval immédiat de la confluence de l'Aygues
- RCC : au PK218.0, dans le Rhône court-circuité au niveau du hangar du club de canoës (SNC)
- PK220 : au PK220.0, à l'aval de la restitution canal de fuite – RCC
- Arles : au PK 282.6, sur le Grand Rhône, à l'aval du pont de Trinquetaille dans Arles

Trois portes de détection avec un seul détecteur (hydrophone) ont été installées :

- Ecluse : au PK 214.7, dans l'écluse, sur sa « rive » droite
- Déversoir : au PK 214.7, au niveau du déversoir du Barrage-Usine
- Fourques : au PK 281.0, sur le Petit Rhône, à l'amont du vieux pont de Fourques

Nous présentons une description synthétique de chaque détecteur en Annexe. Deux exemples sont fournis dans la Figure 4.

Les émetteurs ou marques acoustiques et leur détection

Les émetteurs sont les marques acoustiques qui doivent être implantées dans la cavité intra-péritonéale des poissons par chirurgie.

Les émetteurs HTI (ou tags) Model 795 (Figure 8) sont composés de trois parties :

- une pièce en céramique qui émet un signal sonore à une fréquence de 307.2 kHz
- un circuit électronique qui pilote précisément l'émission
- des batteries au lithium, constituant la plus grosse partie de l'émetteur

Les émetteurs Model 795 transmettent un signal à une fréquence et une longueur d'onde spécifiques avec une phase codée modulée pour améliorer le rapport signal / bruit.

La période entre deux émissions, en milliseconde, identifie l'émetteur (exemple : période 5847 ms). Pour améliorer le pouvoir de détection, il est possible de faire suivre l'émission d'un second signal (subcode) selon un code propre à HTI (exemple subcode : 19). L'identifiant de l'émetteur comporte la période entre les deux émissions du signal et le subcode (exemple : 5847.19 ; Figure 9).



*Figure 8: Émetteurs (Tags) HTI Model 795 de type LZ (69 mm) à gauche et LY (48 mm) à droite – 16 mm de large - et respectivement 24 g et 12 g dans l'air.
(<https://www.innovasea.com/fish-tracking/products/acoustic-transmitters/>)*

Le signal acoustique peut être affecté par la présence de bulle d'air dans l'eau (diffraction du signal), les différences de densité de l'eau, la présence de débris (masque le signal) et les bruits de moteur (saturation ; Figure 9).

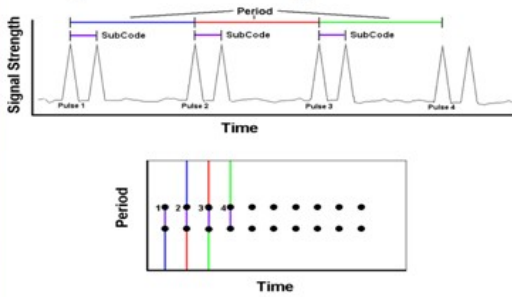
Chaque récepteur enregistre tous les bruits ambiants dans l'eau et sauvegarde ces informations de manière horaire ou journalière.

La recherche des émissions dans les fichiers horaires est faite à posteriori, après transfert des données du récepteur vers un ordinateur, par l'utilisation d'un logiciel dédié appelé MarkTag.

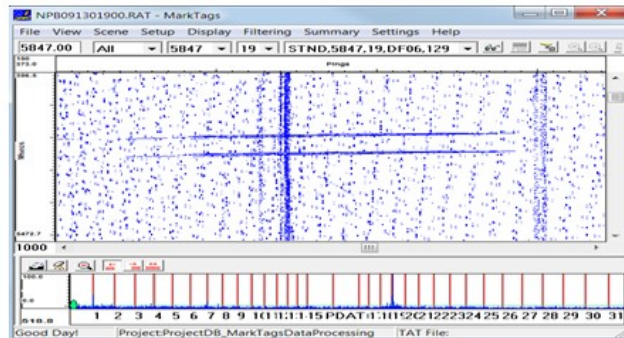
Dans une fenêtre de travail de MarkTags©, les données d'un fichier sont représentées par intervalle continu de quelques secondes (autour de 5.8 sec dans la Figure 9). Tous les intervalles de quelques secondes du fichier lu sont représentés verticalement (origine en haut du graphique) et alignés les uns après les autres horizontalement (depuis la gauche du graphique). Sur la verticale, qui représente un intervalle de quelques secondes, chaque bruit entendu est identifié par un point. Lorsque l'échelle de l'axe vertical est ajustée exactement à la période d'émissions sonores d'une marque (émission sonore + subcode), une série d'émission d'une marque apparaît alors comme deux traits (2 séries de points qui apparaissent à intervalle régulier égal à la période d'émission) parallèles et horizontaux (Figure 9, en haut).

Detecting Acoustic Tags

Tag Period or "Ping" Rate



Double Pulse (Period, Subcode) = Tag ID: 5847.19



What affects a transmitted acoustic pulse?



Entrained Air
(Scattering)



Density Differences
(Bending, Snell's Law,
Sound Speed Changes)



Debris
(Scattering, Blocking)



Acoustic Noise
(Constructive & Destructive
Phase Interference)



Figure 9 : Détail des émissions acoustiques des marques (tags) HTI. Le signal (codé par HTI) est émis à intervalles réguliers (période) de l'ordre de 5.8 secondes dans cet exemple. Cette émission est répétée dans un intervalle fixe (subcode) pour faciliter la détection du signal. Avec le logiciel de post-traitement MarkTags il est facile de détecter les émissions acoustiques d'une marque en réglant l'échelle du temps (verticale) exactement égale à la période (en haut à droite). Pour le projet DAARAC les périodes d'émission acoustique sont de l'ordre de 3 secondes pour augmenter les chances de détection des émissions même si les anguilles se déplacent vite.

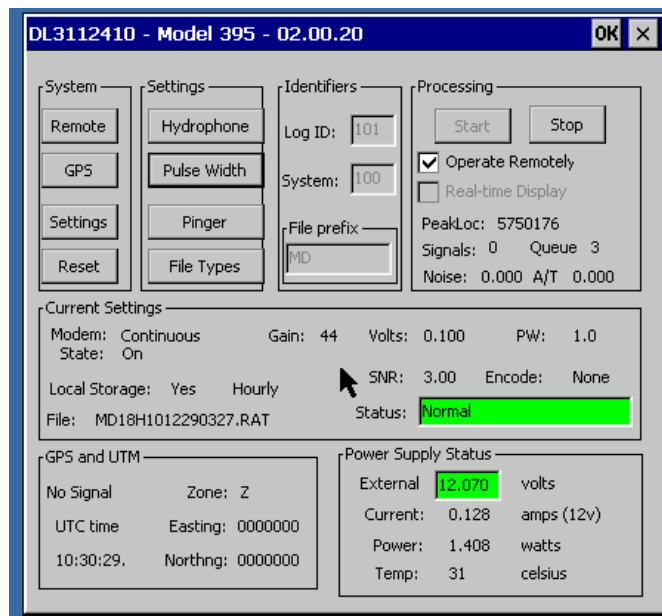


Figure 10 : Interface de l'enregistreur M395 qui permet de configurer l'enregistreur (fichier générés, gestion de l'heure par gps, type de signaux, gain).

L'interface du système d'exploitation des enregistreurs permet de le configurer en fonction des émissions acoustiques attendues et des conditions sonores du milieu étudié (réglage du gain). C'est aussi dans cette interface qu'il est possible de configurer l'enregistrement des données dans des fichiers horaires ou journaliers (Figure 10).

Un réglage très fin du gain (dB) doit être opéré pour filtrer les émissions acoustiques détectées par l'hydrophone, celles issues des marques mais également du milieu ambiant. Des réglages de gain trop faible ne retournent aucun signal (Figure 11, haut-gauche) alors que des réglages de gain trop élevés augmenteront la plage de détection des tags mais cela amplifiera également tout bruit ambiant (Figure 11, haut-droite), rendant impossible la détection du signal émis par les marques des poissons. Une valeur de gain élevée n'améliore pas nécessairement la capacité de détection. Lors des tests de détection, il est important de modifier le gain afin de trouver la valeur la plus précise, celle qui permet de ne conserver que les signaux des marques HTI (graphe en bas à gauche). Un changement de gain de 6 dB modifie le signal de retour d'un facteur de 2 en volts (Figure 11).

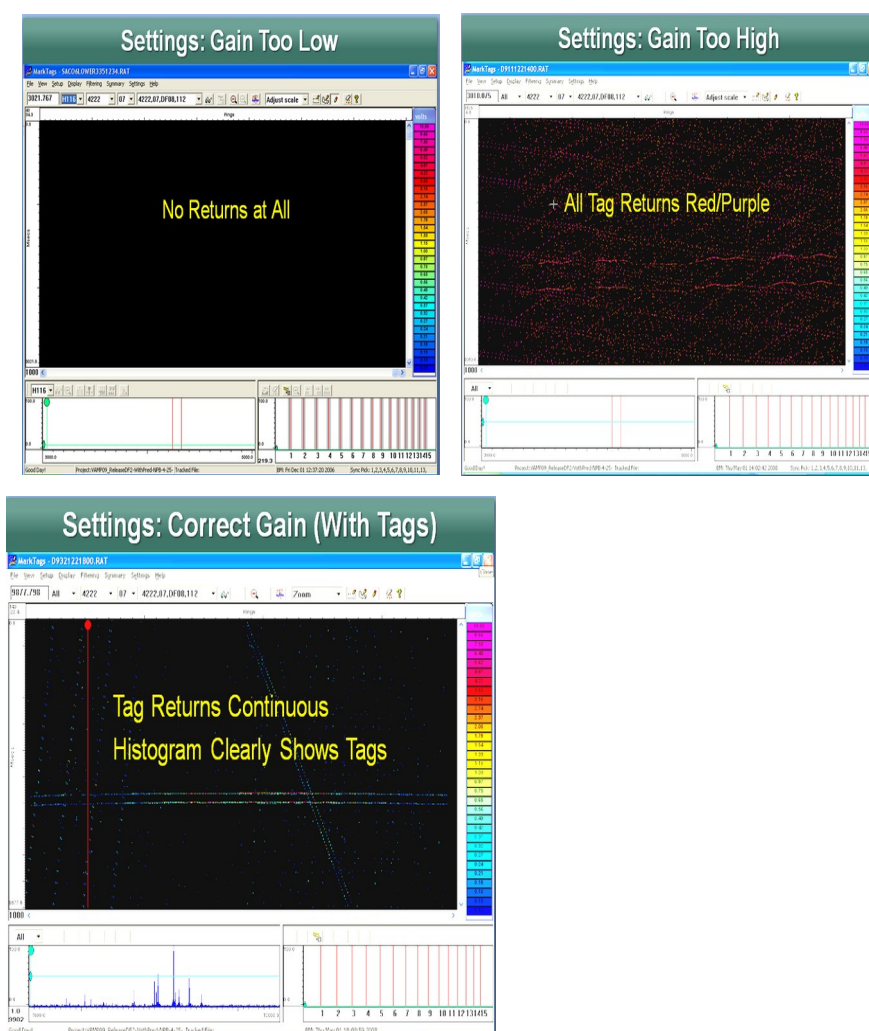


Figure 11 : Visualisation avec MarkTags des enregistrements des émissions acoustiques d'un milieu avec un gain qui filtre trop (en haut à gauche), pas assez (en haut à droite) ou parfaitement (en bas) les bruits ambiants.

Le Post-traitement des données

Le post-traitement peut-être réalisé de manière automatique ou manuelle en visualisant successivement tous les fichiers stockés sur la carte SD des enregistreurs. Étant donné le nombre de fichiers à analyser (24 par jour et par détecteur), l'approche automatique a été privilégiée. Un premier paramétrage adapté aux conditions du Rhône (bruit ambiant) a été déterminé par HTI. Le nombre de signaux successifs minimum recherché est fixé à 5. Cela signifie qu'un individu sera "repérable" si la marque a été entendu pendant au minimum 5*3 secondes successivement.

La recherche a été faite sur l'ensemble des périodes.subcodes des émetteurs utilisés pour l'ensemble des récepteurs. Pour être sûr que la détection corresponde bien à un émetteur et pas à un bruit ambiant, une validation manuelle est effectuée pour chacune des détections automatiques.

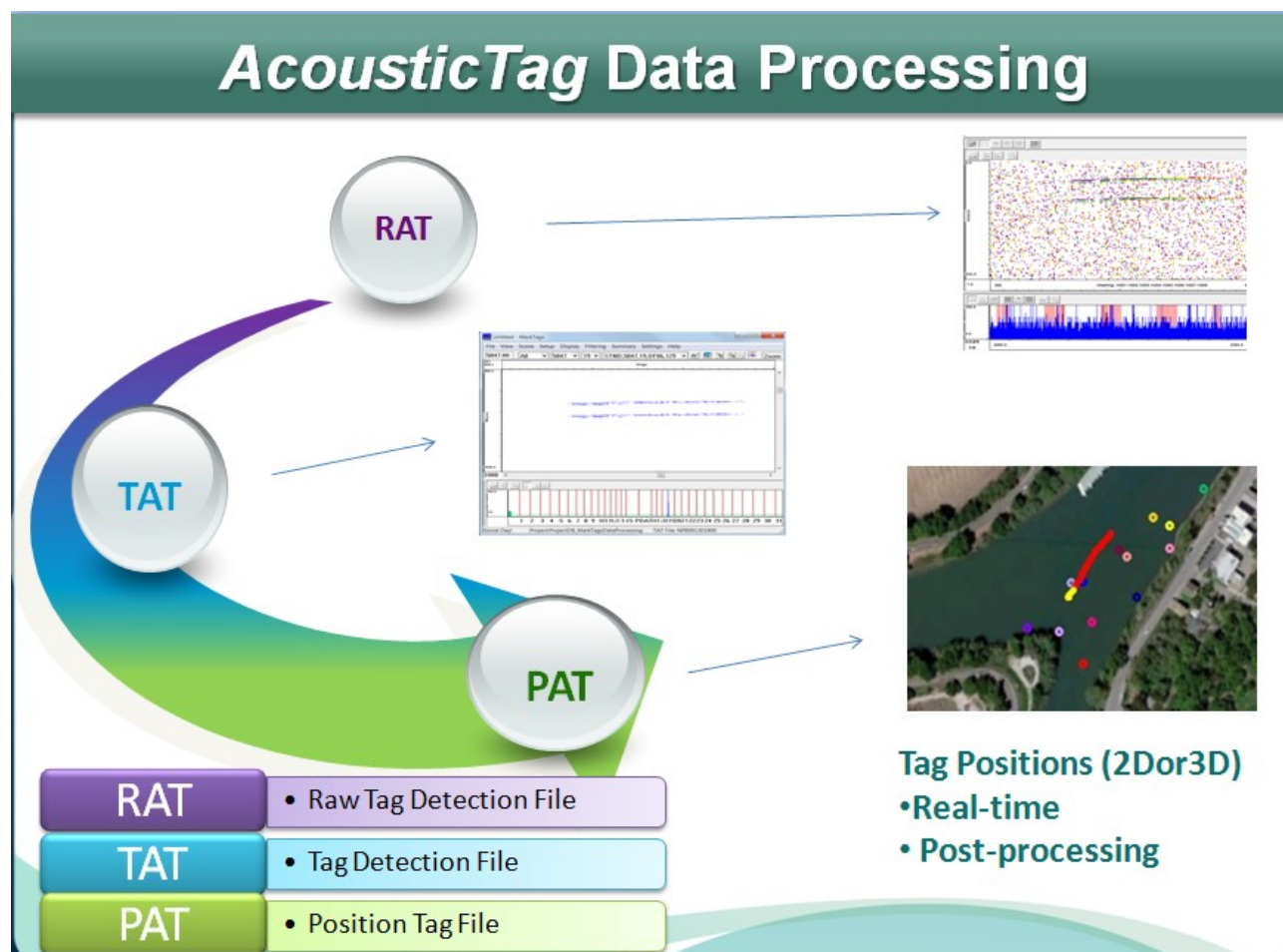


Figure 12 : Succession des différents types de fichiers au cours du post-traitement. Les fichiers bruts issus des cartes SD des enregistreurs (RAT) sont scannés pour isoler les émissions acoustiques des marques utilisées pour l'expérimentation (TAT) ce qui permet de connaître la présence d'une marque donnée dans le rayon de détection d'un hydrophone donné à une heure précise à la seconde.

Les fichiers bruts enregistrés par les logeurs sont des RAT (Raw Tag Detection File). Le post-traitement automatique scanne tous les fichiers RAT pour un enregistreur donné. Après filtration du signal, des fichiers TAT sont générés (Figure 12). Chaque émission d'une marque (période.subcode) détectée par un hydrophone permet de savoir que l'anguille équipée de la marque correspondante était dans le rayon de détection de l'hydrophone à l'heure (hh:mm:ss) de la détection. Ce sont ces données qui seront analysées dans ce rapport pour quantifier la cinétique des dévalisations enregistrées.

Tests de détection

Des tests de la qualité de détection d'une marque dans l'eau ont été fait systématiquement sur l'ensemble des portes de détection. Pour cela, une marque (émetteur) acoustique fixée sur une corde sous une bouée à environ 1 m de profondeur est déplacée dans la zone d'écoute en canoë. Le déplacement à la rame évite l'utilisation d'un moteur thermique qui parasite l'écoute en émettant des bruits dans la gamme des 307 Khz et en générant des bulles d'air qui bloquent la diffusion du son dans l'eau. Le déplacement du canoë est enregistré par un gps toute les secondes.

La Figure 13 montre que l'émetteur test est détecté sur toute la zone prospectée en canoë à la porte Usine (PK218) aussi bien en rive gauche qu'en rive droite. A noter toutefois que par moment l'émission sonore de la marque n'est pas détectée par l'hydrophone (ligne grise de la Figure 13). La Figure 14 permet de montrer qu'un individu détecté par les hydrophones de la porte Aval Usine (PK218) peut être détecté ensuite par l'hydrophone situé sur le vieux Rhône (RCC) en rive droite si sa trajectoire est vraiment rentrante par rapport à la zone de restitution, ce qui est peu probable. L'hydrophone situé en rive gauche du vieux Rhône (RCC) n'est pas en mesure de détecter une marque qui se déplace dans le chenal de l'Aval Usine. Tous les résultats graphiques des tests sont consignés en Annexe.

L'ensemble des résultats des tests tels que décrits ci-dessus peut être résumé dans le Tableau 1. L'objectif de cette synthèse est d'évaluer la capacité de détection de nos portes de détections. Cette évaluation est faite en calculant un pourcentage de détection des émissions sonores de la marque (période de 3055 msec) déplacée avec le canoë par chaque hydrophone des portes de détection. Ces pourcentages varient de 45 % à 100 % avec une médiane de 71 % (si on omet le résultat du test de Arles_RD du 2 octobre 2018 lié à des dysfonctionnement des récepteurs). Ces résultats obtenus à différentes périodes de l'année, donc pour des températures et conditions hydrodynamiques différentes, font qu'il est raisonnable de penser qu'une anguille qui dévale à travers nos portes de détection sera presque certainement détectée, si les deux hydrophones fonctionnent simultanément. En effet même dans le cadre d'un pourcentage de détection plutôt faible (par exemple < 50 %) il existe des détections de la même marque obtenues par les deux hydrophones (simultanément ou pas), ce qui augmente le pourcentage de détection pour la porte dans sa globalité. Ces résultats justifient également l'installation des portes de détection à deux hydrophones plutôt que le déploiement d'hydrophones isolés.

Enfin, un des facteurs limitant fortement la détection d'une émission sonore par un hydrophone est la bathymétrie. En effet derrière des hauts fonds l'hydrophone ne peut entendre l'émission sonore. L'analyse des profils bathymétriques montre qu'aucun obstacle n'est susceptible d'empêcher la diffusion du son des émetteurs dans l'eau du coté de la rive gauche ou de la rive droite de nos portes de détection (exemples présentés pour Usine - Figure 15 et Pk220 - Figure 16). Une anguille marquée est donc techniquement détectable même si elle se déplace très proche du fond.

Tableau 1 : Nombre d'émissions sonores de la marque (période de 3055 msec) déplacées avec le canoë et pourcentage de détection de ces émissions par chaque hydrophone des portes de détection.

Hydrophone	Date	nb de detections	Durée test (sec)	nb théorique d'émission	% d'émissions détectées
PK220_RG	20180828	899	4101	1342,4	67,0
	20190911	502	1972	645,5	77,8
PK220_RD	20180828	671	3664	1199,3	55,9
	20190911	538	1886	617,3	87,1
Usine_RG	20181128	403	1558	510,0	79,0
	20190313	956	3213	1051,7	90,9
Usine_RD	20181128	320	1497	490,0	65,3
	20190313	801	2455	803,6	99,7
Vrhone_RG	20190910	311	1313	429,8	72,4
	20190313	603	2802	917,2	65,7
Vrhone_RD	20190910	312	1698	555,8	56,1
	20190313	375	1764	577,4	64,9
Arles_RG	20181002	417	1608	526,4	79,2
	20190911	349	1191	389,9	89,5
Arles_RD	20181002	17	1608	526,4	3,2
	20190911	175	1191	389,9	44,9

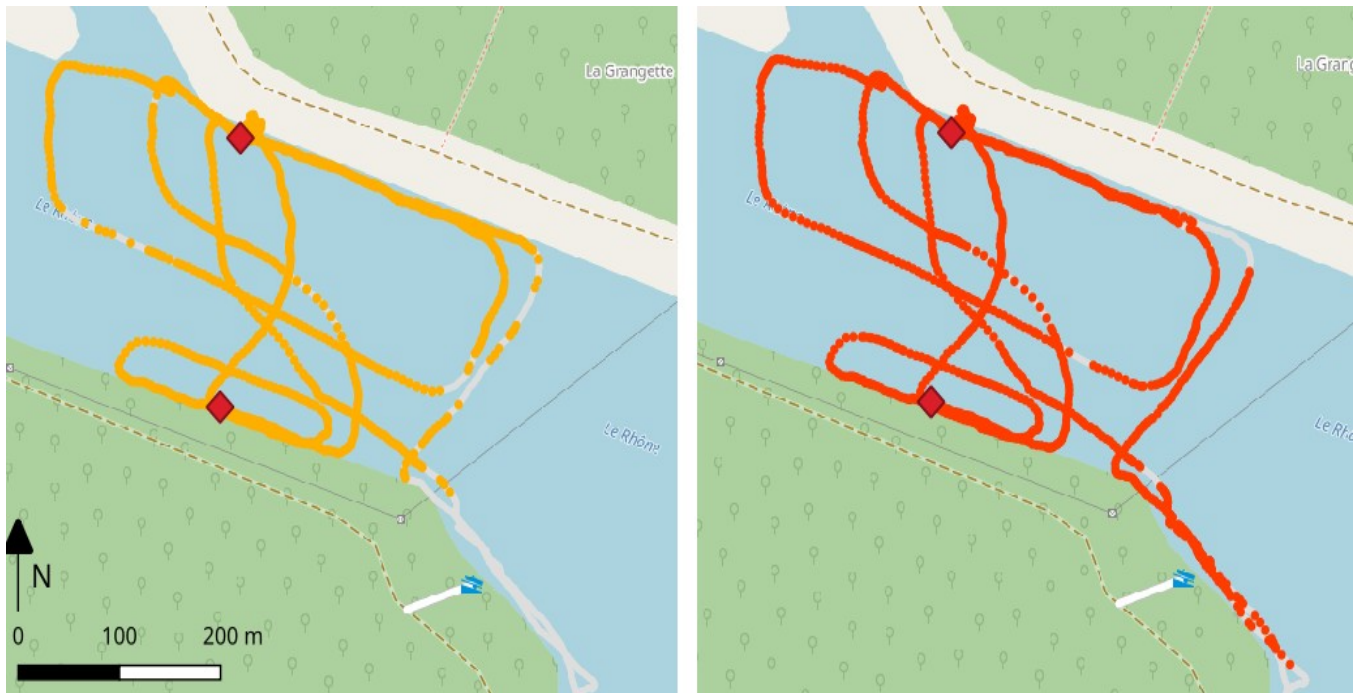


Figure 13 : Résultat du test de détection à la porte de détection Usine (canal de fuite de l'usine de Caderousse - PK218). Les losanges rouges représentent les positions des hydrophones. A gauche (en orange), les détections de la marque déplacée par le canoë par l'hydrophone situé en rive droite, à droite les résultats des détections par l'hydrophone situé en rive gauche. La ligne pleine grisée est la trajectoire de la marque. Lorsque la ligne pleine grisée est visible, aucune émission sonore de la marque n'a été détectée.

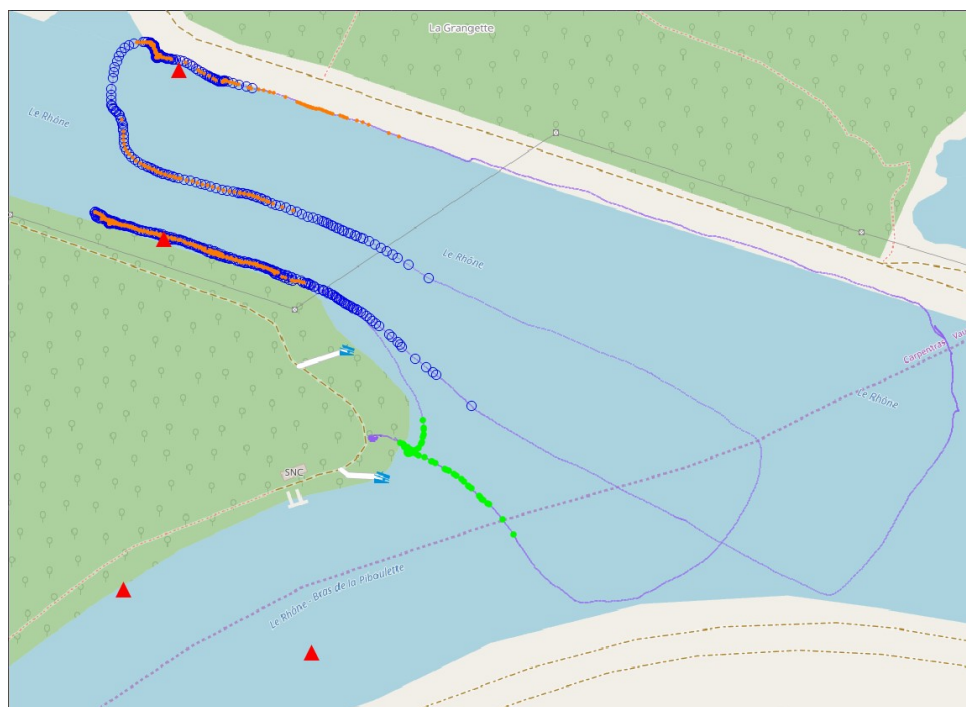


Figure 14 : Résultat du test de détection simultanée au passage de Usine (Pk218) et de RCC (Pk218). En bleu, la détection de l'émission de la marque par l'hydrophone Usine_RG. En orange, la détection de de l'émission de la marque par l'hydrophone Usine_RD. En vert, la détection de l'émission de la marque par RCC_RD.

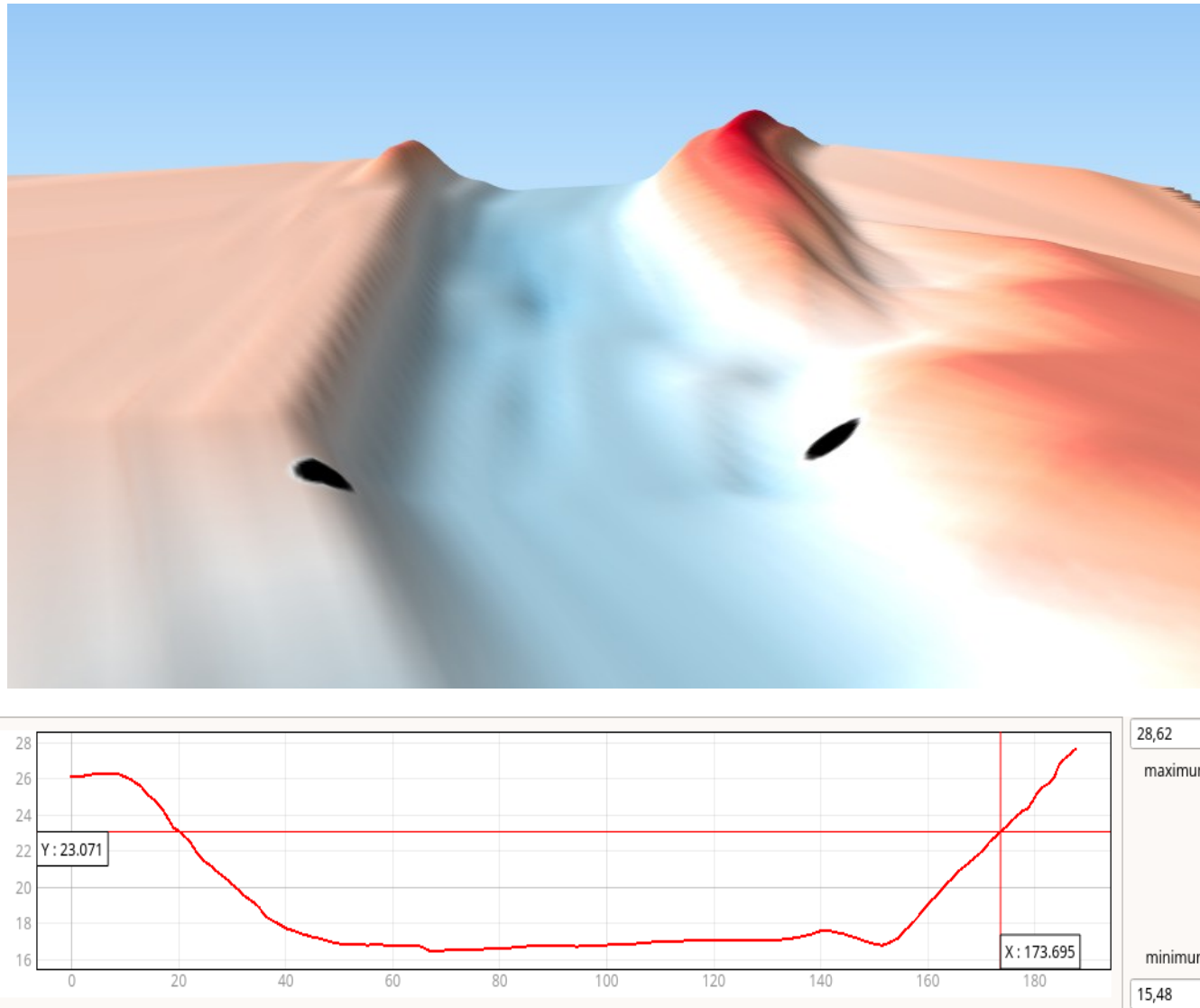


Figure 15 : vue en trois dimensions de la porte de détection Usine à l'aval de l'usine de Caderousse (Pk218) basé sur des profils bathymétriques opérés par la CNR (haut ; les points noirs sont les positions des hydrophones) et profil bathymétrique tracé entre les deux hydrophones (bas ; unités en m ; ordonnées = altitude NGF).

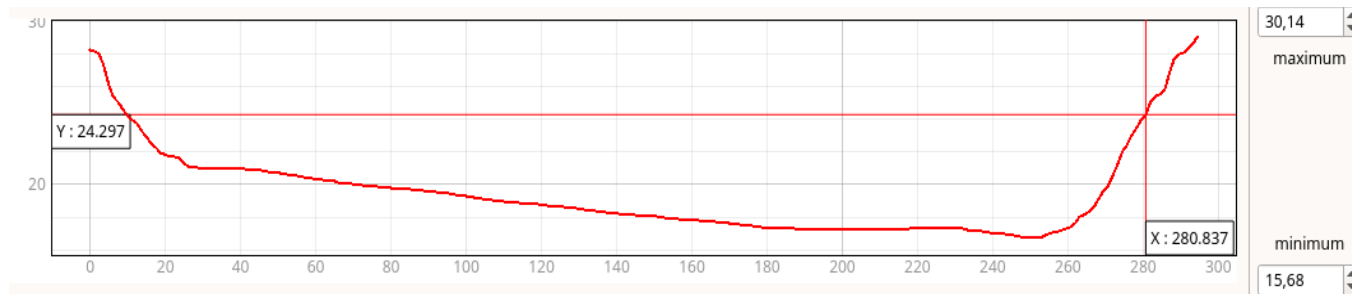
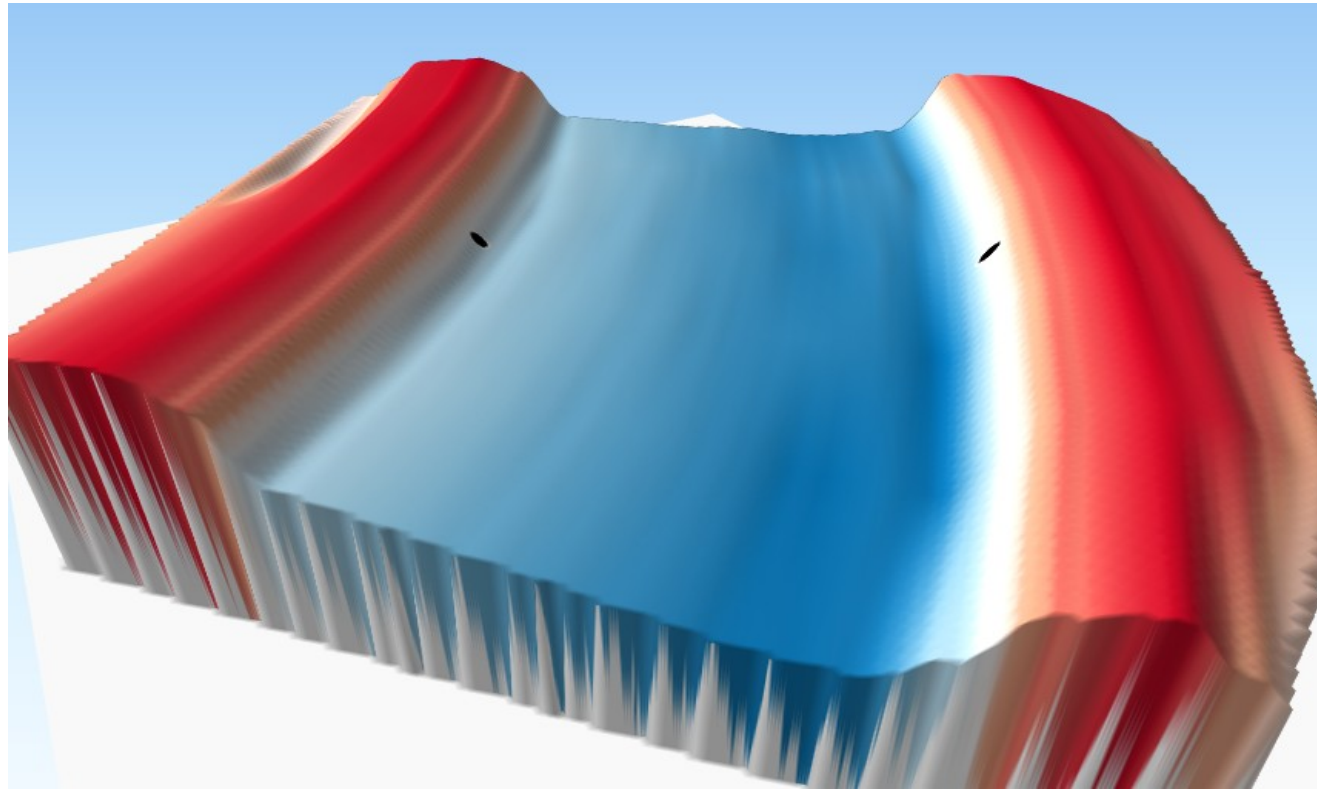


Figure 16 : vue en trois dimensions de la porte de détection PK220 basée sur des profils bathymétriques opérés par la CNR (haut ; les points noirs sont les positions des hydrophones) et profil bathymétrique tracé entre les deux hydrophones (bas ; unités en m ; ordonnées = altitude NGF).

Fonctionnement des enregistreurs pendant l'expérimentation

Le bon fonctionnement des enregistreurs (une porte de détection, une rive, un hydrophone, un enregistreur) est surveillé par l'installation d'un « beacon tag » (une marque HTI) dans l'eau à proximité des hydrophones. Le post-traitement des enregistrements sur toute la durée de l'étude nous permet de savoir quand le système était opérationnel dans les conditions des tests des installations comme décrit ci-dessus.

Les périodes d'émission de ces beacon tags sont de l'ordre de 14 à 16 secondes, sans sub-code (une seule émission non répétée).

Nous présentons ici (Figure 17) les résultats pour le Déversoir et pour Arles Rive Gauche. Les autres résultats sont tous insérés en Annexe.

Fin novembre 2018, une panne électrique du réseau de la ville d'Arles n'a pas permis l'enregistrement des passages en rive gauche pendant trois semaines. En rive droite, le même problème a été constaté. Pour palier à ce problème de coupure et/ou micro-coupure électrique sur le réseau, nous avons installé des onduleurs avec batterie de secours (protection contre les surtensions pour l'électronique) pour les enregistreurs d'Arles ainsi que celui installé sur le Petit Rhône à Fourques.

En 2019, un câble a été arraché à Arles RG suite aux différentes crues survenues en octobre. Ce câble a été réparé le 17 décembre 2019.

Un câble a été coupé (dégradation) à Usine RG. L'installation a été réparée également le 17 décembre 2019. Sur ce même emplacement, une plongée effectuée en novembre 2019 a révélé un dépôt de sédiment provenant de l'Eygues important (de l'ordre d'un mètre) au niveau des hydrophones. Les hydrophones sont installés à l'aval immédiat de la confluence.

Sur le petit Rhône à Fourques, des bruits ambiants importants dans l'eau nous ont conduits à arrêter l'enregistreur. Plusieurs tests ont été faits pour diagnostiquer l'origine du problème sans solution à ce jour. L'installation d'un nouvel hydrophone a été faite à l'amont de celle prévue initialement.

Exceptés les deux incidents subits en Arles (coupure de courant municipale et coupure du câble) ou les coupures de câble sur RCC_RG et Usine_RG le système a presque toujours bien fonctionné, principalement pendant les périodes de dévalaison observées : de 44 % à 100 % des enregistrements ont fourni un fichier de données exploitables (Tableau 2). Les tests de détection ayant démontré l'efficacité des portes, c'est aussi la complémentarité des deux détecteurs de chaque porte qu'il convient d'évaluer. La Figure 17 donne un exemple de visualisation dans le temps du fonctionnement de deux détecteurs (Déversoir et Arles_RG). Chaque trou dans la chronique signifie qu'à ce moment là aucun passage ne pouvait être détecté. L'ensemble des chroniques (tous les détecteurs pendant les quatre années de suivi sont disponibles en Annexe).

Voici un bilan des graphes donnés en Annexe pour la période début septembre – fin décembre de chaque année d'étude (An1 à An4) et pour chaque détecteur / porte :

Déversoir : très bien de An1 à An3 (attention pas fonctionnel en nov An3), mais n'a pas fonctionné pendant An4. Mais ce détecteur était là pour compléter Usine_RD et RG. Donc son mauvais fonctionnement de An4 ne porte pas préjudice à l'étude.

Le détecteur Déversoir a très bien fonctionné, **sauf la dernière année.**

Ecluse : Très bien de An1 à An3 (avec quelques petits trous pendant An2), mais très moyen pendant An4 car rien en novembre et décembre.

Le détecteur Ecluse à très bien fonctionné, **sauf la dernière année.**

Usine : RD : très bien ; RG : bien car quelques trous en novembre An3 et novembre An4. En couplant les deux détecteurs Usine_RD et RG on a seulement des trous début décembre An2, fin septembre An4 et fin octobre An4).

La porte de détection Usine a été performante les trois premières années et moins pendant An4.

RCC : RD : très bien malgré quelques trous pendant An2 et pas mal de problèmes pendant An4 ; RG : très bien pendant An1 et 2 alors que pas mal de trous pendant An3 et 4. En couplant les deux détecteurs RCC_RD et RG on a eu des trous seulement début décembre de An2 et en octobre An4.

La porte de détection RCC a très bien fonctionné.

Pk220 : RD : excellent malgré quelques trous pendant An2 ; RG : très bien malgré quelques trous pendant An3 et 4. En couplant les deux détecteurs Pk220_RD et RG la porte PK220 a très bien fonctionné tout le temps.

La porte de détection Pk220 a très bien fonctionné.

Arles_Grd_Rhône : RD:pas mal de trous pendant An1 et rien pendant An4, et très bien pendant An2 et 3 ; RG : Bien pendant An1 (quelques trous en novembre), très moyen pendant An2 (trous fin septembre – début octobre et fin décembre). Très bien pour An3 et 4. En couplant les deux détecteurs Arles_RD et RG la porte Arles_Grd_Rhone a toujours bien fonctionné sauf la première moitié de novembre An1 et fin septembre de An2.

La porte de détection Arles_Grg_Rhône a bien fonctionné, **excepté fin novembre An1**

Arles_Ptt_Rhône : Fonctionnement très bon pour An1 et 2 avec quelques trous en novembre de An2, très moyen pour An3 (trous en septembre, octobre et fin décembre) et carrément plus rien en An4. Ayant constaté qu'aucune anguille n'avait emprunté la route du petit Rhône au cours des trois premières saisons de dévalaison, nous n'avons pas passé de temps à maintenir le bon fonctionnement sur ce détecteur pour la dernière année. Cela ne devrait pas avoir d'influence sur les résultats de l'étude.

Le détecteur de Arles_Ptt_Rhône a fonctionné de moins en moins bien ; a priori sans conséquence.

Globalement la dernière année a été très compliquée pour pratiquement tous les détecteurs. Pour chaque détecteur et porte de de détection, nous avons eu globalement une bonne qualité d'écoute lors des trois premières années. La porte Pk220 a très bien fonctionné, y compris en An4 et possède un fort pouvoir de détection (Tableau 1). La porte Pk220 sera donc une référence pour évaluer les dévalaisons des anguilles marquées. Les portes RCC et Usine (sauf An4) ont également très bien fonctionné et grâce à leur fort pouvoir de détection elles permettront de déterminer les voies de passage de manière assez sereine (sauf la route de l'usine pour An4).

L'ensemble du dispositif peut être considéré comme ayant répondu aux attentes, malgré quelques trous. Les efforts déployés pour maintenir tout ce système en fonctionnement pendant les quatre années de l'étude ont été énormes. Le fonctionnement général du système au regard des problèmes rencontrés et des efforts fournis pour y remédié, est plus que satisfaisant parce qu'il ne semble pas être associé à un biais important dans les résultats qui seront présentés ci-après.

Tableau 2 : Pourcentage de temps de fonctionnement jugé bon (enregistrement de fichiers exploitables avec une limite de taille de fichier fixée à 4 Mo ; au-delà de 4 Mo cela signifie qu'il y avait beaucoup trop de bruit ambiant pour détecter une marque) par détecteur (enregistreur des sons détectés par un hydrophone) par année d'étude entre début septembre et fin février. A noter que pour Arles_RG deux hydrophones étaient immergés pour les deux dernières années d'étude en vue d'assurer une très bonne surveillance des dévalaisons.

Porte de détection	Année de suivi de sept n à fin fév n+1			
	An1	An2	An3	An4
ECLUSE	68	94	100	14
DEVERSOIR	57	100	86	0
USINE_RD	99	78	93	44
USINE_RG	96	66	100	62
RCC_RG	98	80	58	57
RCC_RD	99	80	78	66
PK220_RD	98	79	97	98
PK220_RG	100	93	96	79
ARLES_RG	80	61	98	99
ARLES_RD	56	85	92	6
PT_RHONE	92	73	51	0

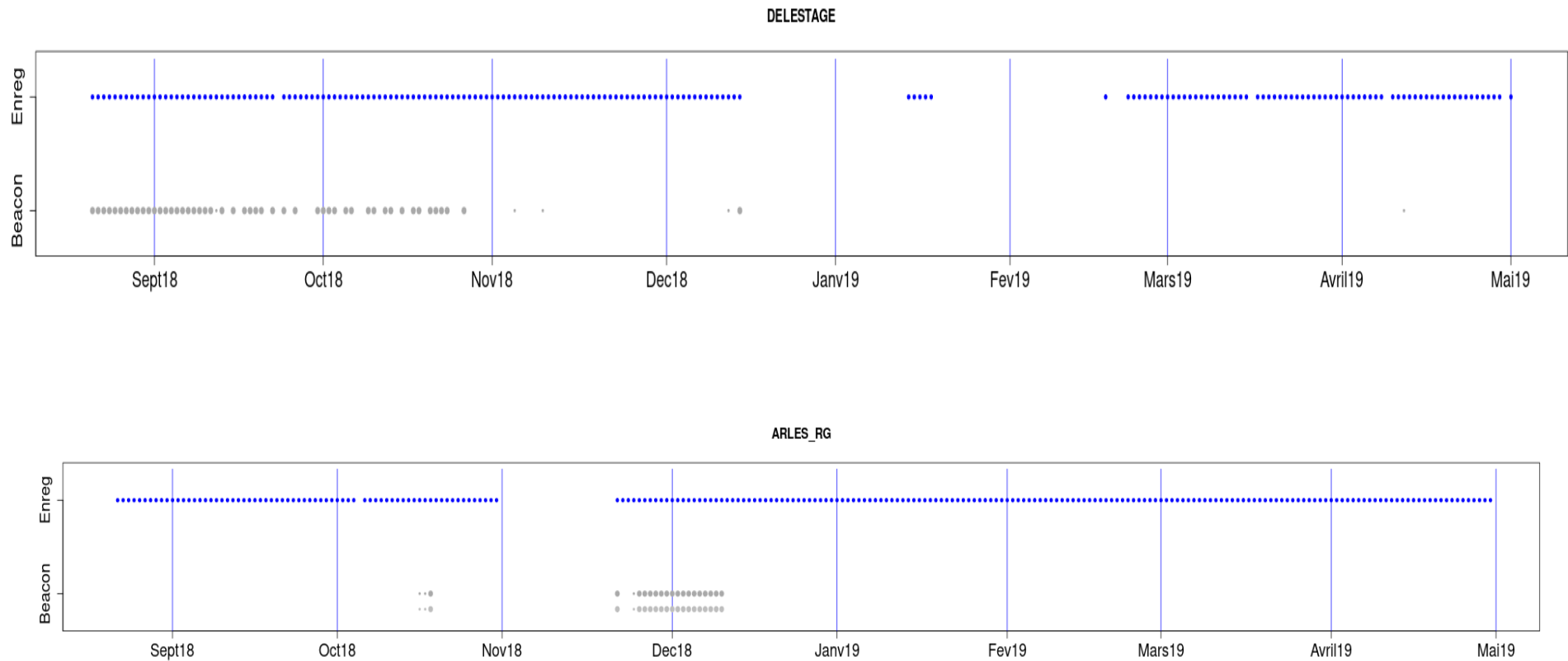


Figure 17 : Représentation graphique du fonctionnement des enregistreurs (une porte de détection, une rive, un hydrophone, un enregistreur) sur An#1, en haut le Déversoir (appelé ici Delestage et en bas Arles Rive Gauche. Enreg = un fichier RAT a été enregistré sur la carte SD de l'enregistreur; Beacon = il y a autant de lignes que d'hydrophone à la porte de détection avec la première ligne correspondant au beacon tag le plus proche de l'hydrophone étudié. Les gros points signifient > 5000 détections par jour (sur 5400 possibles pour une période de 16 sec) et les petits points signifient > 500 détections par jour. L'absence de point sur une ligne correspond à une absence de détection.(voir tous les résultats en Annexe)

CAPTURES ET MARQUAGE DES ANGUILLES

Le projet DAARAC implique le marquage d'anguilles argentée et nécessite à ce titre, d'un point de vue éthique, une autorisation ministérielle d'expérimentation. Cette autorisation d'expérimenter a été accordée au projet DAARAC (APAFIS#14024 – 2018031215031554 V2) le 15 décembre 2018 par le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, après avis favorable du comité d'éthique animale n° 073.

Le protocole prévoyait de marquer n=100 anguilles argentées chaque année pendant de 2018 à 2020 fin août début septembre.

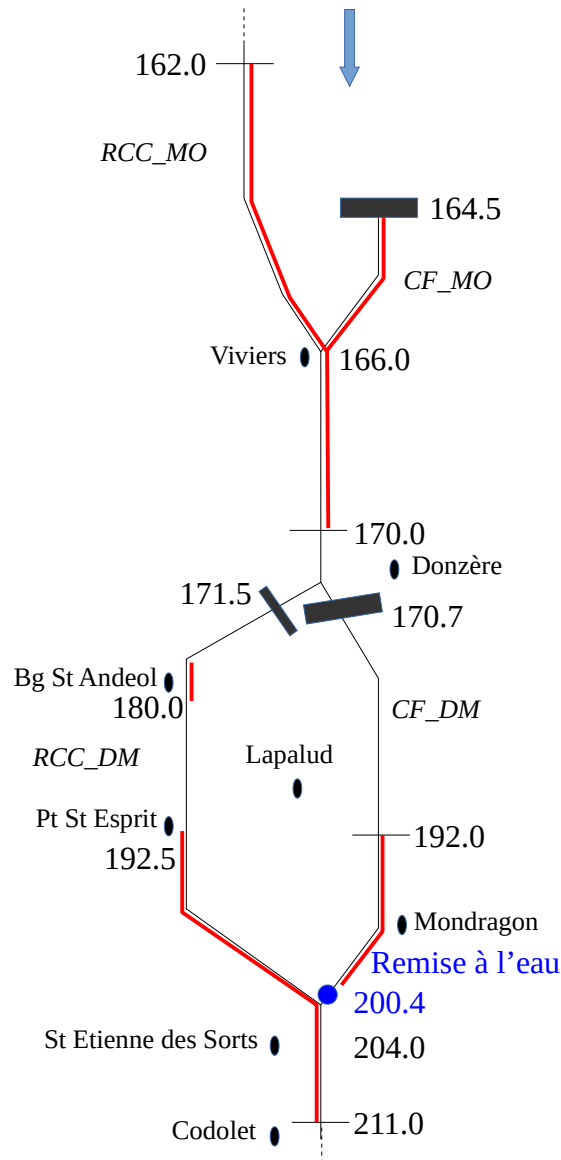


Figure 18 : Schématisation du site d'échantillonnage sur le Rhône à l'amont de l'aménagement de Caderousse (Barrage situé au Pk213). Nous avons différencié deux origines de capture pour les anguilles argentées marquée : « Amont » pour une capture en amont du Pk170 et « Marquage » pour une capture entre les PK 172 et 211. Les traits rouges symbolise les linéaires de rives échantillonnés. Les chiffres sont les Points Kilométriques (PK). Les points noirs avec un nom sont les communes. Au Pk200.4 le point de remise à l'eau des anguilles argentées marquées est indiqué en bleu. La flèche bleue en haut indique le sens du courant. RCC = Rhône court-circuité ; CF = canal de fuite ; MO = Aménagement CNR de Montélimar ; DM = Aménagement CNR de Donzère Mondragon.

Capture des anguilles

Les anguilles sont capturées selon trois stratégies d'échantillonnage.

* la première consiste à échantillonner les berges du Rhône de manière plus ou moins systématique à l'électricité. Cette pêche se fait depuis une embarcation avec au minimum une personne habilitée qui manie l'anode et une personne qui capture les anguilles avec une épuisette. La taille des anguilles est estimée visuellement et seules les individus de plus de 600 g sont conservés dans un vivier à bord du bateau. La biométrie confirmera que bon nombre d'individus sont inférieurs à 600 g, ce qui confirme que les gros individus ne sont pas remis à l'eau suite à une mauvaise estimation de la masse. Le vivier est régulièrement vidé dans le bac de stabulation en attendant la biométrie, et ce d'autant plus fréquemment que le nombre d'individus et / ou la température de l'air / de l'eau sont élevés. La stratégie de pêche à l'électricité est mise en œuvre sur les secteurs « Amont » et « Marquage » (Figure 18).

[Nota : Après trois sessions d'échantillonnage, de 2018, 2019 et 2020, nous pouvons indiquer que l'habitat des grandes anguilles argentées (> 600 mm) prospectable en pêche électrique sont les enrochements de bordure. Ces enrochements doivent avoir une taille de bloc assez grosse (très majoritairement plusieurs dizaines de cm) et être associés à une hauteur d'eau d'au moins 1 m (plusieurs « couches » de blocs). De plus un léger courant qui longe la berge semble préférable à une vitesse nulle. Les zones de faible profondeur ou les blocs très colmatés par les limons semblent moins colonisés par les anguilles que les blocs non ou peu colmatés.]

L'effort de pêche à l'électricité a été conséquent chaque année. Par exemple en 2018 environ 48h de pêche effective (à plusieurs bateaux) sur environ 32 km de rive ont été effectués.

* la seconde stratégie, mise en œuvre principalement sur le secteur « Marquage », entre les Pk 212 et 2014, a été réalisée par le pêcheur professionnel JL Fontaine. Il a placé des Verveux (n=10 à 20 selon les conditions de débit et de vent), ouverture vers l'aval, en différents points sur chaque rive du Rhône. Le choix de l'emplacement des Verveux est dicté par l'expérience de Mr. Fontaine en fonction du débit et donc des veines de courant et des profondeurs du secteur échantillonné. Une fois positionnés, les verveux sont laissés plusieurs jours (2 à 4) en place avant d'être relevés. Lors du relevé des verveux (tôt le matin) les anguilles estimées plus lourdes que 600 g sont placées dans un vivier qui sera récupéré au plus vite par l'équipe de biométrie. Ce vivier sera rapporté en camion ou bateau jusqu'au stand de biométrie où les anguilles seront soit placées en stabulation soit triées directement.

* la troisième stratégie d'échantillonnage est l'utilisation de verveux par le pêcheur professionnel JL Fontaine sur ses baux de pêche en lagune (étang Vacarès ; étangs près de Arles) dans des habitats peu saumâtres. Ce secteur d'échantillonnage est appelé « Sud ». Les anguilles estimées plus lourdes que 600 g sont placées dans un vivier et montées à Mondragon en camion. Là selon les dates des captures les anguilles sont soit déposées directement dans le bac de stabulation soit dans des poches immergées dans le Rhône en attendant l'arrivée de l'équipe de biométrie.

Le protocole de biométrie et de marquage

Après leur capture les anguilles peuvent être placées en stabulation dans un bac de très grosse capacité dont l'eau peut facilement être renouvelée et dans lequel un bullage permanent assure une oxygénation de

l'eau adéquate. En cas de conditions extrêmes de chaleur et ou de densité de poissons un bullage avec de l'oxygène est possible. Les anguilles peuvent ainsi rester en stabulation plusieurs heures sans aucun souci de survie. Mais souvent les poissons capturés peuvent passer directement à l'atelier de biométrie sans stabulation.

L'atelier de biométrie se déroule comme suit :

- balnéation dans un vivier avec 30 L d'eau + Eugénol à 10 % (dans alcool pur) dosé à 1.1 ml / 10 litre d'eau ;
- mesure de la longueur totale, de la masse, du diamètre moyen de l'œil (moyenne du diamètre vertical et du diamètre horizontal) et de la longueur de la nageoire pectorale ;
- détermination du stade d'argenture à partir du modèle Durif 2009 programmé sur une feuille Excel (MRM).

Si l'anguille est en stade FIII ou plus et si elle est en bonne forme elle est sélectionnée pour être marquée. Si une anguille au stade FII a une masse suffisante (> 600 g) alors elle peut être marquée. Le choix de la marque à implanter dans l'anguille est fonction de sa masse (plus de 600 g pour les marques LY et plus de 1200 g pour les marque LZ ; la marque doit représenter au maximum 2 % de la masse du poisson dans l'air).

L'atelier de marquage se déroule alors comme suit (cf. protocole en annexe) :

- l'anguille est anesthésiée dans un bac avec 30 L d'eau + Eugénol à 10 % (dans alcool pur) dosé à 1.1 ml / 1 litre d'eau jusqu'à endormissement complet (absence de réaction) ;
- elle est ensuite placée dans un support de chirurgie qui permet de réaliser l'acte chirurgical hors de l'eau en conservant la tête de l'anguille dans l'eau (l'eugénol permet aux poissons de continuer à ventiler). Un circuit d'eau fermé assure le renouvellement de l'eau dans le support de chirurgie. De l'eugénol à 10 % est ajouté à l'eau avec un dosage de 1.1 ml/ 1 litre d'eau, pour maintenir l'individu en anesthésie ;
- après désinfection de la peau (vetedine®) et incision au scalpel entre la tête et la papille urogénitale, juste avant la papille uro-génitale, la marque est insérée émetteur vers la tête, et la plaie est refermée avec plusieurs points de suture simples ;
- l'anguille est alors placée dans un bac d'eau claire pour la récupération, pendant au moins une heure. L'expérience montre que cette durée est tout à fait suffisante pour que l'anguille recouvre ses capacités de nage et d'évitement (prédateurs). Si un individu ne récupère pas de l'opération, il sera aussi très facile de le détecter après une heure (le poisson reste sur le dos si on le positionne comme cela au fond du bac). Dans ce cas le poisson est euthanasié et la marque est récupérée.
- Un pit tag (petite marque passive) est également implantée pendant la chirurgie. Ces marques permettent d'identifier très facilement l'individu en cas de recapture.
- Les anguilles sont toutes relâchées à l'extrémité aval en rive droite du canal de fuite de Donzère (Pk200.4 ; Figure 18). Les faibles vitesses de courant et la présence d'enrochements permettent un retour au Rhône assez calme et sécurisé.

Résultats du Marquage

Trois sessions de marquages ont été faites, en 2018, 2019 et 2020, principalement sur la dernière semaine d'août et la première semaine de septembre avec une seconde session en novembre en 2018 et 2019.

Au total n=234 anguilles ont été marquées et relâchées à hauteur de Mondragon – à la confluence du canal de fuite de du Vieux Rhône (RCC) de l'aménagement CNR de Donzère – Mondragon (DM) (Figure 18), qui se répartissent comme suit :

Les dates de marquage exactes sont présentées dans le Tableau 3 :

- * pour 2018 : 28-30 août, 4-6 septembre (n=72) et 9 novembre (n=12) pour n=84 anguilles marquées
- * pour 2019 : 26-29 août, 2-4 septembre (n=71) et 6 novembre (n=20) pour n=91 anguilles marquées
- * pour 2020 : 25-31 août, 1-3 septembre (n=59) pour n=59 anguilles marquées

Les anguilles marquées proviennent principalement de la zone de marquage (RCC et Canal de fuite de DM et retenue de Caderousse; n = 130), puis de l'amont de l'aménagement de DM, à Viviers (n=84) et enfin, uniquement en 2019 des lots de pêche de Mr JL Fontaine en pourtour de Méditerranée (n=20 ; Tableau 3).

Le stade principalement marqué est le stade Durif FIII (n=168 ; 72 %). Viennent ensuite les stades FIV (n=23 ; 10%), FV (n=28 ; 12 %), Mâles dévalant s (MD) (n=9 ; 4%) en 2019 exclusivement puis le stade FII (n=6 ; 3%). Les MD n'ont été capturés que dans le Sud (Tableau 3).

En 2018, n=2 anguilles sont mortes lors du marquage et n=1 en 2019 et en 2020. La mort est constatée avant que le poisson ne soit relâché (lors de la phase de récupération de 1 heure minimum post-chirurgie). L'individu n'est pas pris en compte dans le nombre de poissons marqué et la marque est récupérée, désinfectée et réutilisée.

Le marquage se déroule selon la description contenue dans le dossier éthique. Les doses d'Eugénol (anesthésique utilisé) semblent bien adaptées. Cependant quelques individus semblent totalement insensibles à cet anesthésique ; elles se réveillent très vite, avant même le fin de l'insertion de la marque parfois. Mais cela concerne moins de dix individus par an. Ces cas particuliers mis à part une implantation de marque (de la sortie du bac d'endormissement, à la chirurgie et à la dépose dans le bac de récupération) se réalise en moyenne en moins de 10 min avec de l'expérience et un stand de marquage bien organisé (matériel et personnel). Cette étape est extrêmement importante.

Tableau 3 : Descriptif des effectifs marqués, de la longueur totale et de la masse moyennes des anguilles marquées pour le projet DAARAC en 2018, 2019 et 2020 par grand secteur de pêche (zone de Marquage = RCC et Canal de fuite de DM et retenue de Caderousse; zone Amont = autour de Viviers; Sud = sud du bassin du Rhône en bordure de Méditerranée - étangs pêcheur pro JLF) et par stade d'argenture (FII à FV pour les femelles argentées et MD pour le mâles argentés ; Durif et al., 2005).

Année	Stade	Effectif				Longueur Totale moyenne (mm)				Masse moyenne (g)			
		Amont	Marquage	Sud	Total	Amont	Marquage	Sud	Globale	Amont	Marquage	Sud	Globale
2018	FII	1			1	805			805	983			983
	FIII	18	42		60	740	720		726	754	699		715
	FIV	4	5		9	808	794		800	1107	1136		1123
	FV	2	12		14	721	704		707	686	664		667
	Total	25	59	0	84	752	723		732	814	729		754
2019	FIII	15	48	2	65	713	713	732	713	673	695	875	695
	FIV	3	1	5	9	824	820	743	779	1165	1175	925	1033
	FV	2	2	4	8	724	691	690	699	750	690	655	688
	MD			9	9			430	430			157	157
	Total	20	51	20	91	730	714	590	690	755	704	521	675
2020	FII	3	2		5	724	688		710	673	548		623
	FIII	28	15		43	745	714		734	762	668		729
	FIV	4	1		5	807	668		779	1126	570		1015
	FV	4	2		6	664	712		680	534	583		550
	Total	39	20	0	59	741	709		730	769	643		726
Total		84	130	20	234	742	717	590	715	779	706	521	716

Résultats de la biométrie

La variabilité individuelle de croissance, liée à des histoires de vie très différentes du fait des âges et des stades d'argenture très variables entre les individus conduit à une relation taille poids de qualité très moyenne (Figure 19).

Cependant, les relations taille-poids des anguilles marquées en 2018, 2019 et 2020 ne diffèrent pas énormément malgré la présence d'anguilles du Sud (Figure 19 et Figure 20 et Tableau 4), et notamment la présence de mâles dévalant (< 500 mm).

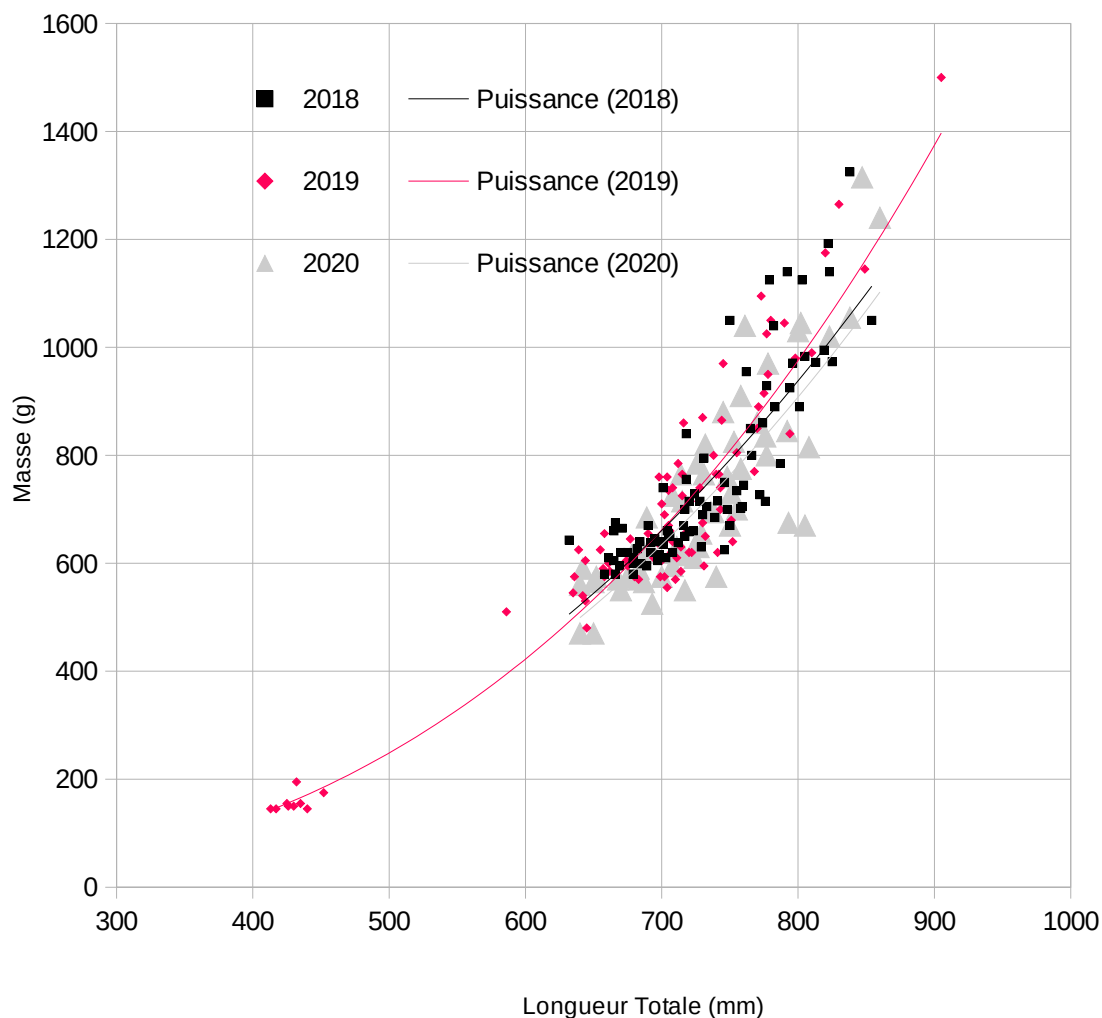


Figure 19: Relation taille – poids des anguilles marquées en 2018 (carrés noirs), 2019 (losanges rouges) et 2020 (triangles gris) pour le projet DAARAC à Mondragon (Vaucluse, 84). Un modèle Puissance est ajusté aux données pour chaque année (courbes). A noter que les limites de masse minimum pour l'implantation chirurgicale des balises HTI sont : LF > 150 g; LY > 600 g et LZ > 1200 g.

La longueur totale (en mm) et la masse (en g) moyennes sont à peu près équivalentes (715 mm et 716 g respectivement). La masse moyenne des anguilles argentées femelles (FII à FV) marquées varie de 550 à 1123 g. La masse moyenne des mâles argentés (MD) est de 157 g.

Il y a quelques différences entre les relations taille-poids des anguilles marquées, principalement liées à leur origine (exemple les anguilles du Sud semblent plus lourdes que les anguilles locales pour une taille

donnée) et aux gammes de tailles échantillonnées (aucun échantillonnage n'a permis de capturer des petites (MD) et des grandes anguilles ($800 > \text{mm}$) en même temps). La relation taille – poids incluant l'ensemble des individus échantillonnés semble cependant acceptable par défaut pour évaluer la masse des anguilles argentées de taille supérieure à 400 mm (Tableau 4).

Dans le rapport de l'étude de faisabilité (Capra et al., 2014) l'analyse de plusieurs jeux de données biométriques sur l'anguille du Rhône (Onema, CNR – MRM – pêcheur pro et Irstea Aix en Provence – G. Carrel) avait conclu à une assez forte stabilité des coefficients de la relation taille – masse, de $0.327 \text{ E-}07$ à $8.607 \text{ E-}07$ pour le coefficient A et de 3.13 à 3.61 pour le coefficient B, pour des individus de 100 mm à 1100 mm.

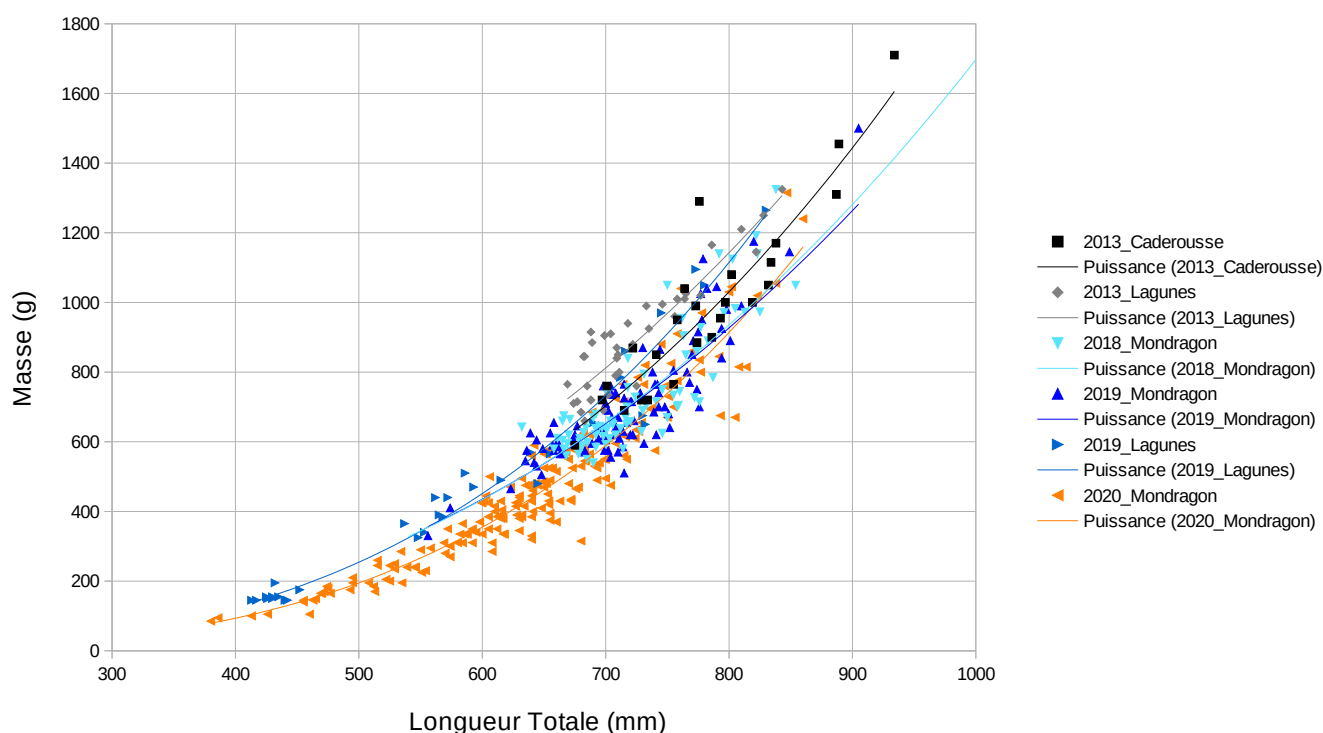


Figure 20 : Relation taille – poids de toutes les anguilles capturées dans le Rhône et dans les lagunes et étangs du Sud en 2013, 2018, 20019 et 2020 ($n=467$) et passées à la biométrie. Un modèle Puissance est ajusté aux données pour chaque jeu de données (courbes).

Tableau 4 : Coefficients de l'équation de la relation taille – poids des anguilles capturées dans le Rhône et dans les lagunes - étangs du Sud en 2013, 2018, 2019 et 2020. Les effectifs et les coefficients A et B sont donnés par année*secteur de pêche et pour la globalité des anguilles présentées à la biométrie lors du projet DAARAC. (L'équation est de forme $Y = A * X^B$).

Données	n	A	B
2013_Caderousse	25	4.99E-06	2.8642
2013_Lagunes	37	41.90E-06	2.5613
2018_Mondragon	82	16.69E-06	2.6691
2019_Mondragon	95	21.56E-06	2.6294
2019_Lagunes	33	0.83E-06	3.1439
2020_Mondragon	195	0.26E-06	3.2895
Globale	467	3.00E-07	3.2786

Cette stabilité relative se retrouve aussi dans nos données qui intègrent tous les individus capturés et présentés à la biométrie depuis l'expérimentation test de 2013 jusqu'à la session DAARAC de 2020 (Tableau 4). Les coefficients A et B pour le modèle global (Tableau 4) sont dans l'intervalle des coefficients obtenus avec l'analyse des données « historiques » disponibles en 2013.

Pour le projet DAARAC, n=37 individus marqués avec une marque LY de 12 g avaient une masse inférieure à 600 g (de 525 g à 599 g). La masse de la marque utilisée (12 g) représente 2,3 % de la masse de la marque dans l'air, ce qui reste très acceptable relativement à la règle des 2 % (Brown et al., 1999; Winter, 1983). Tous les stades d'argenteure entre FII et FV étaient représentés dans ces n=37 individus. N=4 individus avaient une masse comprise entre 470 g et 510 g et ils ont été marqués avec une marque LF de masse 6 g.

Le problème rencontré, en revanche, est le rapport entre le diamètre de la marque HTI (1 cm pour les marques LY ou LZ) et le diamètre du corps des anguilles (6-8 cm environ) et de leur cavité intrapéritonéale en particulier. Parfois il est assez délicat d'insérer la marque au milieu des replis de l'intestin. Les conséquences peuvent être délicates pour les individus si la marque ne prend pas sa place rapidement dans l'organisme. Par exemple deux individus marqués en 2018 ont été re-capturés en 2019 (identifiés grâce à leur Pit-Tag) dans un état physiologique critique : maigreur extrême. Les anguilles avaient perdu 382 g (772 à 390 g soit -49 %) et 205 g (715 à 510 g soit -29 %) en une année. Les deux anguilles avaient cependant des cicatrices parfaites, mais l'une avait perdu sa marque HTI. Ainsi, les résultats de cette étude seront interprétés sans oublier que l'étape du marquage des anguilles peut avoir de lourdes conséquences sur la survie des individus, leur processus de métamorphose (évolution vers le stade FV) et par conséquence sur leur comportement de déplacement et plus particulièrement leur comportement migration vers la mer.

SYNTHESE DES OBSERVATIONS 2018-2022

Les détections aux portes

Sur n=234 anguilles argentées marquées en 2018 (n=84 ind.), 2019 (n=91 ind.) et 2020 (n= 59 ind.), n=79 anguilles (34 % des anguilles marquées) sont considérées comme ayant dévalé sur les quatre années de suivi.

Les analyses par année s'entendent ici selon des années « biologiques » déterminées du 1° mai de l'année n au 30 avril de l'année n+1. Ces limites viennent du fait que les marquages ont lieu en été (fin août – début septembre) pour la majorité et que la dévalaison s'observe généralement l'hiver. Ainsi notre étude se déroule sur les quatre années biologiques suivantes :

- An1 du 1° mai 2018 au 30 avril 2019
- An2 du 1° mai 2019 au 30 avril 2020
- An3 du 1° mai 2020 au 30 avril 2021
- An4 du 1° mai 2021 au 30 avril 2022

Nous analyserons les données de franchissement de l'aménagement de Caderousse uniquement sur les trois premières années du projet DAARAC, c'est à dire pour n=73 individus (31% des individus marqués) dont les détections permettent de 1) les considérées comme ayant dévalé et 2) de connaître leur voie de passage.

[N=6 des anguilles détectée à l'aménagement de Caderousse peuvent aussi être jugées comme ayant dévalé. Mais pour n=4 il est impossible de savoir si elles ont vraiment franchi l'aménagement. Elles ont été détectées à l'amont immédiat de l'usine (juste en amont du mur béton), par le détecteur du Déversoir, sans jamais être re-contactées par la suite ni à une porte de détection ni en mobile (voir plus loin). Les deux autres anguilles ont été contactées à l'aval de l'aménagement au cours de la quatrième année de suivi lors de suivis mobiles. Mais il n'est pas possible de déterminer leur voie de passage à travers l'aménagement de Caderousse, même si l'hypothèse d'un passage via l'Usine est très probable.]

De manière très générale nous avons enregistré (Tableau 5) :

- n=24 franchissements (33 % des détections ; 29 % des n=84 anguilles marquées) la première année.
- n=32 franchissements (43% des détections ; 21 % des n=151 anguilles théoriquement encore en amont de Caderousse) la deuxième année (en supposant aucun arrêt d'émission des marques).
- n=17 franchissements (23 % des détections ; 10% des n=178 anguilles théoriquement encore en amont de Caderousse) la troisième année (en supposant aucun arrêt d'émission des marques).

Lors de la quatrième année d'étude, n=161 individus étaient théoriquement encore en amont de l'aménagement de Caderousse (en supposant aucun arrêt d'émission des marques).

[Pour information les marques LY, majoritairement utilisées, ont une durée de vie constructeur de 912 jours pour des périodes d'émissions autour de 3 sec, soit 2 ans et 6 mois. Ainsi les marques LY utilisées en été 2018 devaient en théorie fonctionner jusque début mars 2021, soit la presque totalité des trois premières années de suivi étudiées ici. Les marque LZ utilisées pour les très gros individus ont une durée de vie constructeur de quatre ans pour des périodes d'émissions autour de 3 sec. Enfin, les marque LF, utilisées pour les plus petits individus ont une durée de vie constructeur de 170 j (pour 3 sec), c'est à dire un peu moins de 6 mois]

Les proportions des stades d'argenteure parmi les individus dévalant (n=73 ; Tableau 5) sont assez proches des proportions des stades d'argenteure dans la population des poissons marqués (n=234 ; Tableau 3) :

- * n=2 anguilles FII (qui représentent 2 % des anguilles marquées) ont dévalé (2.7 % des anguilles ayant dévalé) ;
- * n=47 anguilles FIII (qui représentent 72 % des anguilles marquées) ont dévalé (64.4 % des anguilles ayant dévalé) ;
- * n=13 anguilles FIV (qui représentent 10 % des anguilles marquées) ont dévalé (17.8 % des anguilles ayant dévalé) ;
- * n=10 anguilles FV (qui représentent 12 % des anguilles marquées) ont dévalé (13.7 % des anguilles ayant dévalé) ;
- * n=1 anguille MD (qui représentent 4 % des anguilles marquées) a dévalé (1.4 % des anguilles ayant dévalé) ;

Même si les effectifs sont plus faibles que pour le stade FIII, les individus marqués au stade FIV et FV dévalent proportionnellement plus que ceux marqués au stade FIII. Par stade d'argenteure, les proportions d'anguilles ayant dévalé sont de 47/168 marquées (29%) pour le stade FIII, 13/23 marquées (57%) pour le stade FIV, 10/28 marquées (36%) pour le stade FV et 1/9 marquées (11%) pour le stade MD. Notons que sur les n=6 individus marqués au stade d'argenteure FII, n=2 (33%) ont dévalé.

Parmi les trois origines possibles des anguilles (zone de marquage, amont ou sud), les anguilles venant du sud dévalent relativement plus (40% des n=20 anguilles « sud » marquées) que celles capturées sur la zone de marquage (35% des n=130 anguilles « marquage » marquées) et que celles capturées à l'amont de la zone de marquage (24% des n=84 anguille « amont » marquées).

Le Tableau 5 résume l'ensemble des détections sur les deux routes principales pour le franchissement de l'aménagement de Caderousse (Usine ou RCC) en distinguant la zone de capture des individus, l'année d'enregistrement et le stade d'argenteure des individus au moment du marquage.

Passage aux portes

Le nombre de détections pour chaque porte (attention une même anguille a pu être détectée à plusieurs portes) est de n=47 à Déversoir, n=56 à Usine, n=24 à RCC, n=62 à Pk220 et n=18 en Arles (Grand Rhône). Aucune anguille n'a été détectée dans le petit Rhône à Fourques. Enfin une seule détection à été enregistrée dans l'écluse.

Si les détections sont analysées par individu, n=37 anguilles ont été détectées à Déversoir ET à Usine et n=50 ont été détectées à Usine ET à Pk220. Et parmi les n=18 individus détectés en Arles, n=14 ont été détectées à Usine, puis Pk220 et Arles (grand Rhône).

N=24 anguilles ont été détectées à RCC et seulement n=11 anguilles ont été détectées à RCC ET à PK220 et n=4 de ces anguilles sont arrivées en Arles (grand Rhône). N=13 individus ont été détectés à RCC mais également à Usine ou Deversoire. Une analyse détaillée des données (notamment les chronologies de détection) de chacune de ces anguilles a montré que :

Tableau 5 : Synthèse des effectifs d'anguilles argentées détectées lors du franchissement de l'aménagement de Caderousse (CNR) sur le Rhône, sur les trois années de suivi (2018-2021). Les résultats sont présentés par année de suivi (An #1, 2 et 3), par voie de passage à travers l'aménagement (RCC ou Usine) par stade d'argenture (selon Durif et al., 2005) et par origine de capture.

N=2 anguilles (3048.14 - FIII-Marquage et 3457.01 FII-Marquage) ont dévalé lors de la quatrième année (An#4) mais sans être détectées par les portes de détection Usine ou RCC. En revanche les deux anguilles ont été contactées en suivi mobile à l'aval de l'aménagement en juin et juillet 2021). L'anguille 3048.14 a été détectée au PK220 lors de la crue débutée le 11 mai 2021. Pour faciliter la présentation du tableau ces deux anguilles n'ont pas été renseignées ci-dessous.

Enfin, n=4 individus ont été détectées au droit du mur de l'usine, côté amont, sans jamais être détectées à l'aval ni contactées en mobile.

Effectif	Capture	Route du Vieux Rhône (RCC)					Route de l'Usine					Total		
		FII	FIII	FIV	FV	MD	Total	FII	FIII	FIV	FV		MD	Total
An#1	Amont				1		1	1	3	1			5	6
	Marquage		1		2		3		10	2	3		15	18
	Total		1		3		4		1	13	3	3	20	24
An#2	Amont		1				1		1	2			3	4
	Marquage		3	1			4		16				16	20
	Sud				1	1	2		2	2	2		6	8
Total		4	1	1	1	7		19	4	2		25	32	
An#3	Amont						0		5	4	1		10	10
	Marquage		3				3	1	2	1			4	7
	Total		3				3	1	7	5	1		14	17

- n=10 sont jugées comme ayant emprunté la route de l'Usine, mais elles ont aussi été détectées à RCC – références soulignées ci-après
- n= 2 sont jugées comme ayant emprunté la route du RCC - références en gras rouge ci-après
- n=1 atypique jugée au final comme ayant emprunté la route du RCC – référence en gras rouge ci-après.

 Le détail de cette analyse est consigné ci-après, avec chaque anguille identifiée par son code HTI = période-subcode (les données individuelles sont en Annexe).

3088_25 détectée d'abord au déversoir, puis 3 jours après à RCC, sans détection Usine et avec détection PK200 ensuite. Donc a priori elle n'était pas morte, puisque normalement il faut peu de temps pour aller de Deversoir à Pk220. Elle a sans doute pu remonter au barrage, avec RCC au débit réservé, (20180901 – 20180903), soit qq jours après marquage. Donc jugée **RCC**

3175_25 : très rapide de Usine à RCC mais ensuite 10h pour aller au Pk220 et surtout entendue 4 mois après à nouveau RCC et Pk220

3190_27 : bien passée par usine, mais six jours entre Deversoir et Usine et quatre jours entre Usine et RCC et jamais entendue à Pk220.

3211_11 : marquée fin août 2019. Elle arrive début nov 2019 au Déversoir, puis plus rien jusqu'à mi novembre au RCC_rd. Donc a priori elle est passée par RCC. Mais ensuite elle est entendue jusqu'au 22 nov dans le secteur de RCC_rg. Elle n'est jamais allé plus loin. Donc jugée **RCC**

3265_13 : parcours atypique – Quelques jours après marquage elle a été entendue au Déversoir. Puis plus rien pendant sept mois. Là on la trouve dans l'écluse (la seule détection dans l'écluse !!). Puis, un mois plus tard au RCC et enfin à l'Usine. Donc si toutes les détections sont correctes, elle serait peut être passée par déversoir / turbines, puis remonté sept mois après dans écluse, avant de mettre 1 mois à redescendre via le RCC – Donc jugée Usine ET **RCC**

3301_10 : passage via usine, mais détectée aussi par RCC-rd (possible d'après les test ; Figure 14)

3307_13 : idem

3328_13 : idem

3343_07 : entendue d'abord à Usine_rd puis RCC_rd trois jour après et plusieurs fois ensuite; contactée en mobile à l'aval en 2020 et 2021. Sans doute restée dans le secteur aval usine – restitution

3377_24 : dévale trois jours après le marquage en arrivant au Deversoir (20200905), passe l'usine et s'arrête. Puis repart et est détectée par RCC 20 j après et PK220 dans la foulée (10h plus tard).

3406_16 : le lendemain du marquage, détectée au Déversoir (20200902). Mais détectée à Usine que le 20200911 et passe devant RCC puis PK220 17h après. Il y a un gros écart entre RCC_rd (20 min après usine) et RCC-rg (6h après usine). L'anguille a du faire un stop au niveau de la restitution, donc être détectée par RCC, puis repartir vers PK220.

3571_07 : marquée 20200831 et détectée usine 20200905, puis 13h plus tard à RCC et 1h plus tard au Pk220.

3580_05 : marquée 20200827 et détectée au Déversoir 20201220, puis six jours après à Usine, y reste 9h et est entendue par RCC 2h plus tard. Mais pas entendue au Pk220.

Même si les tests de détection avaient montré que c'était possible (Figure 14), la majorité des individus passés par Usine n'ont pas été entendus par RCC ; seuls n=10/ 60 ont été détectés à RCC.

La proportion de stade FV utilisant la route du RCC lors de leur dévalaison est forte parmi les anguilles de stade FV ayant dévalé (n=4/10 ; 40 %), comparativement aux autres stades d'argenture et forte également parmi les n=14 individus détectés au total dans le RCC (29%; Tableau 5).

Finalement ce sont **n=14 individus, 19%** des n=73 anguilles étudiées, qui peuvent être considérés comme ayant franchi l'aménagement de Caderousse **via le Barrage et le RCC**, contre **n=59 via l'Usine et la canal de fuite, 81%** des n=73 anguilles étudiées (auxquelles il convient d'ajouter les n=2 détectées en 2021) - (Tableau 5).

Sur les n=62 anguilles détectées à Pk220, n=50/59 (85%) ont franchi l'aménagement via l'usine, n=11/14 (79%) via le RCC et n=1 (3048_14) a été entendue uniquement au Pk220 (pas d'identification de route de dévalaison). Donc parmi les n=73 individus pour lesquels une route de dévalaison est définissable, n=12 (16 %) anguilles n'ont pas été jusqu'au Pk220 après leur franchissement de l'aménagement de Caderousse. Ce sont 15% (via usine) et 21% (via Rcc) des anguilles argentées qui ont franchi l'aménagement de Caderousse qui se sont arrêtées AVANT le Pk220, soit moins de 2 km plus à l'aval.

[N=5 anguilles ont été détectées à Usine uniquement (3001_01, 3076_13, 3274_01, 3307_19 et 3397_17). Pour 3001_01 nous sommes presque certains (même si aucune preuve formelle ne peut être apportée) qu'elle est morte. Sa marque a été entendue presque deux mois à la porte de détection Usine et plus rien. Une seule anguille marquée n'a été détectée qu'à la porte de détection du RCC (3190_19). Ensuite n=4 anguilles ont été entendues soit à Déversoir et Usine (3397_19), soit à Usine et RCC (3343_07), soit à Deversoir, Usine et RCC (3190_27 et 3580_05) et n=2 anguilles ont été entendues à RCC et Usine (3211_11 et 3265_13) sans jamais être entendues plus à l'aval.]

Parmi les n=12 anguilles ayant franchi l'aménagement (n=9 via l'usine et n=3 via RCC) sans avoir été détectées au PK220 ou en Arles, n=6 avaient été marquées en 2018, n=5 en 2019 et n=1 en 2020 et n=2 ont été détectées la première année (An1), n=9 ont été détectées la deuxième année (An2), et n=1 a été détectée la troisième année (An3).

Parmi les n=62 anguilles détectées à Pk220, n=18 anguilles ont été détectées en Arles (Grand Rhône), n=14 ayant franchi l'aménagement de Caderousse via l'usine et n=4 via le RCC.

[Les individus ayant atteint Arles et ayant franchi l'aménagement via l'usine sont : 3064_17, 3125_04, 3175_01, 3179_02, 3190_17, 3196_19, 3196_29, 3196_31, 3253_01, 3445_25, 3529_17, 3544_13, 3565_31, 3592_25. Les anguilles ayant franchi l'aménagement via le RCC sont : 3013_01, 3194_26, 3417_31, 3590_09. Parmi ces individus n=3 ont été marqués en 2018, n=10 en 2019 et n= 5 en 2020 et n=3 ont dévalé la première année (An1), n=8 la deuxième année (An2) et n=7 la troisième année (An3). N=12 de ces individus ont été capturés autour de la zone de marquage et n=6 en amont, ce qui renforce l'intérêt de capturer des individus au sein du site d'étude. N=14 individus étaient au stade FIII lors du marquage (7.7 % des FIII marquées), n=2 au stade FIV (8.7 % des FIV marquées), n=1 au stade FV (3.6 % des FV marquées) et n=1 au stade FII (17 % des FII marquées). Leur taille variait de 640 à 850 mm pour une masse variant de 565 g à 1315 g.]

Les mâles argentés (MD) n'ayant pas encore été détectés à la fin de An2 (avril 2020) ne pouvaient plus être entendus du fait des 170 j d'autonomie des marques LF (donnée constructeur pour des émissions à 3 sec).

ATTENTION ici nous examinons les n=79 anguilles ayant dévalé.

Les individus ayant dévalé n'ont pas une taille/masse différente (723 mm – Sd = 68 mm / 759 g – Sd = 213 g - n=79), des individus qui sont restés autour de la zone de marquage (711 mm – Sd= 81 mm / 694 g – Sd=205 g - n=155 ; Figure 21).

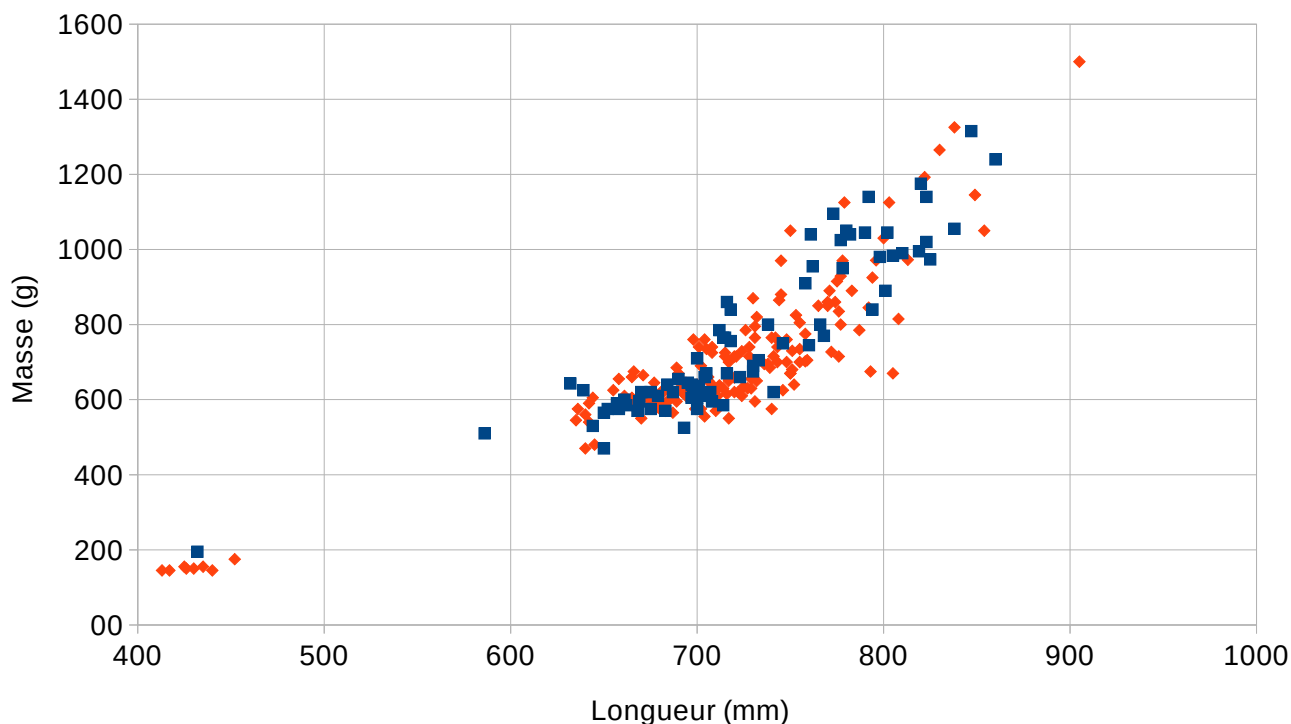


Figure 21 : Description des tailles et des masses des individus marqués ayant dévalés (carrés bleus) ou non (losanges oranges).

Enfin, la majorité des anguilles dévalent dans l'hiver suivant le marquage.

Seules n=6 anguilles marquées en 2018 ont été détectées la deuxième année du suivi (An2); toutes étaient issues de la Zone de Marquage, au Stade FIII lors du marquage et n=4 sont passées par l'usine, n=1 par le RCC et n=1 sans voie de passage déterminée. Aucune anguille marquée en 2018 (An1) n'a été détectée en troisième année de suivi (An3).

N=3 anguilles marquées en 2019 (An2) ont été détectées en troisième année de suivi (An3); n=2 étaient issues de l'amont et n=1 était issue de la Zone de marquage. Toutes étaient des FIII et sont passées par l'usine. Aucune anguille marquée en 2019 (An2) n'a été détectée en quatrième année de suivi (An4).

Quelques détails des passages aux portes de détection (hydrophones)

Heures de détection des anguilles aux portes de détection

Nous voulons analyser ici si le nombre de détections est le plus important la nuit que le jour.

Les détections au Déversoir sont réparties sur pratiquement 24h et de manière similaire entre les anguilles marquées en 2018, 2019 et 2020 (Figure 22). Si on considère que la plupart des passages se font entre octobre et décembre (nuit supposée de [17h00 à 7h00]), la majorité des enregistrements (n=32/47) des anguilles au Déversoir, se font de nuit. Il en va de même quel que soit le récepteur des portes de détections : n=67/83 détections à Usine, n=26/38 détections à RCC et n=94/109 détections à Pk220 ont été enregistrées entre 17h et 7h (Figure 23). Seul le récepteur Arles_RG a enregistré une minorité d'anguilles la nuit : n=7/18.

Il est important ici de rappeler que le déversoir permet d'évacuer $95 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et qu'il n'est pas possible d'y détecter le passage d'une anguille compte tenu de la vitesse d'écoulement de l'ordre de $3 \text{ à } 5 \text{ m s}^{-1}$ minimum. De ce fait une anguille qui passerait l'usine via ce Déversoir serait comptabilisée comme ayant emprunté la route de l'Usine mais sans être passée à travers les turbines. En An1 seule n=1 anguille sur les n=20 ayant emprunté la route de l'usine aurait pu passer par le déversoir compte tenu des jours de fonctionnement de celui-ci (données CNR). En An2, n=18 (parmi n=25) anguilles ont été détectées sur la route de l'usine alors que le déversoir était ouvert. En An3, seules n=2 (parmi n=14) anguilles ont été détectées sur la route de l'usine alors que le déversoir était ouvert.

La variabilité interannuelle du passage via l'usine pendant une phase d'ouverture du déversoir porte à croire que celui-ci ne doit pas être utilisé, en tout cas pas de manière systématique. En comparaison du passage par les turbines, un passage par le déversoir n'offre aucun danger de blessure par la turbine. Cependant la chute depuis la surface de la retenue jusqu'à l'aval de l'usine (entre 4 et 9 m en fonction du débit), sans être fatale doit être assez stressante pour une anguille.

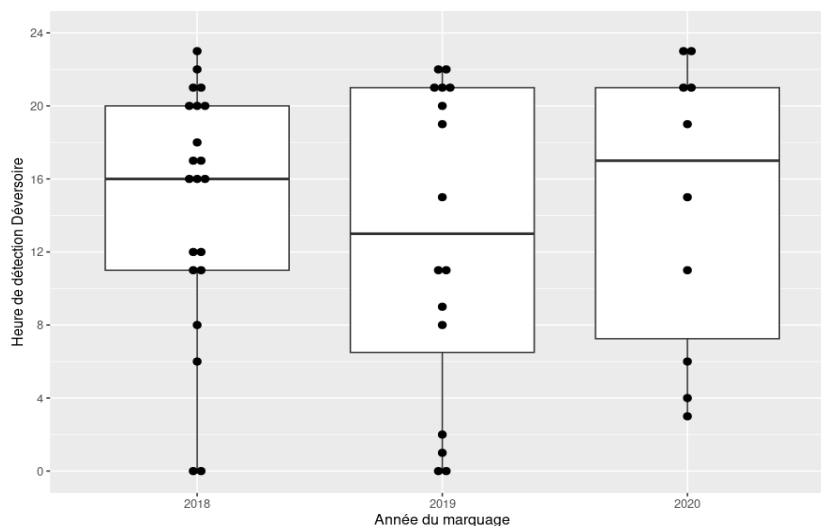


Figure 22 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des heures de la journée (entre 0h00 et 23h59) des détections des marques HTI des anguilles au Déversoir entre septembre 2018 et avril 2021. Les distributions sont présentées par année de marquage. Pour information, entre septembre et mars, la période de la journée dans laquelle fluctue le lever du soleil est de 7h00 à 8h44 et 16h56 à 20h30 pour le coucher du soleil.

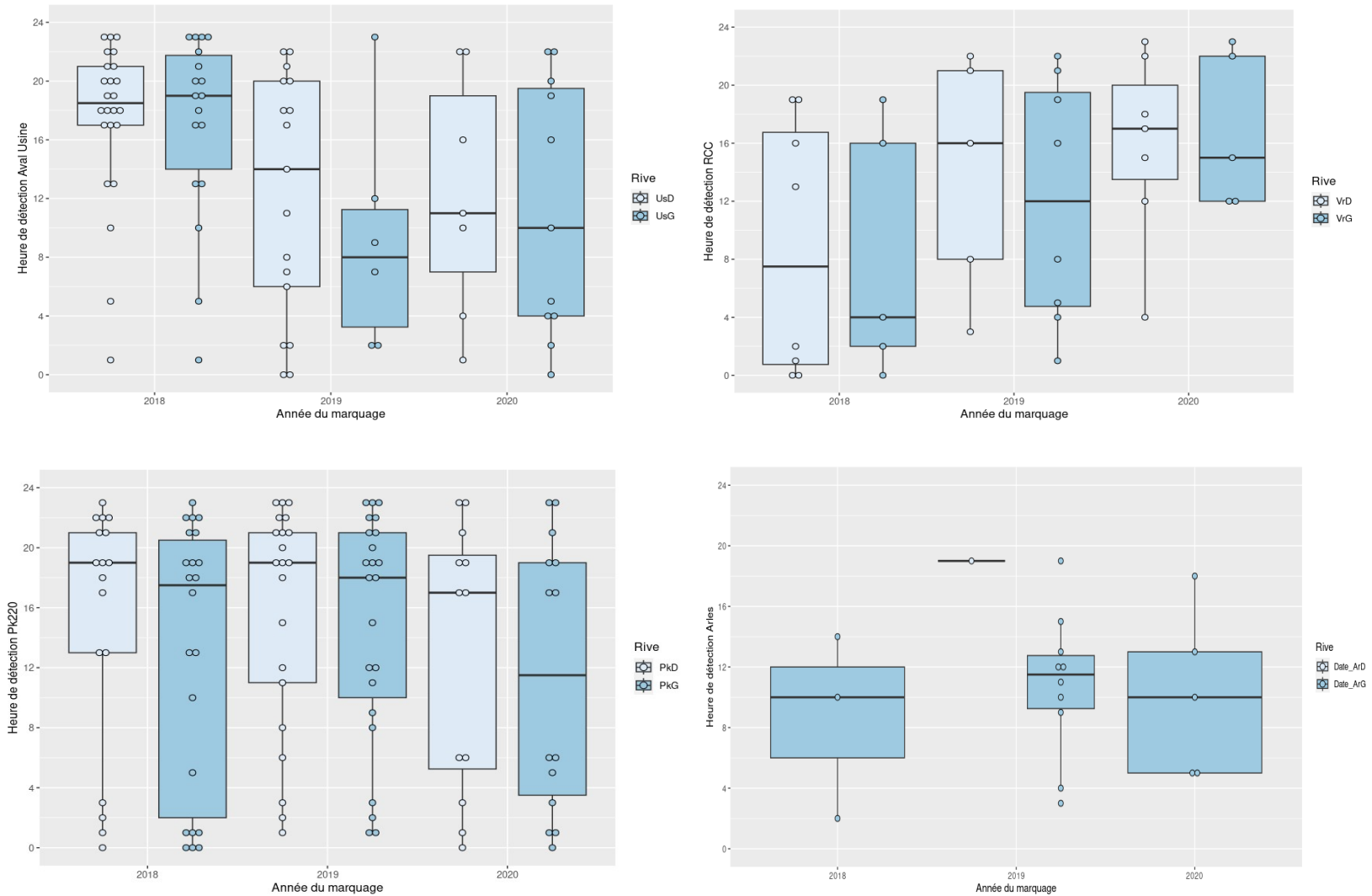


Figure 23 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des heures de la journée (entre 0h00 et 23h59) des détections des marques HTI des anguilles ayant franchi l'aménagement CNR de Caderousse entre septembre 2018 et avril 2021. Les distributions sont présentées par année de marquage et par la position de l'hydrophone ayant détecté la marque (en rive Droite (bleu clair) ou Gauche (bleu sombre)). Pour information, entre septembre et mars, la période de la journée dans laquelle fluctue le lever du soleil est de 7h00 à 8h44 et 16h56 à 20h30 pour le coucher du soleil.

Délai entre marquage et détection aux différentes portes de détection

Dans cette partie nous allons nous intéresser au temps écoulé entre le marquage des anguilles et leurs détections aux différentes portes de détection.

Les distributions des temps de trajet des anguilles marquées dévalant entre la zone de marquage et les portes de détection Déversoir, Usine, RCC et Pk220 sont assez comparables, variant de 4-6 h (pour les valeurs min) à 2098 h (environ 87 j) pour le troisième quartile. La distribution de temps écoulé pendant la dévalaison entre le marquage et Arles est un peu plus homogène : de 930h à 2804h (environ 39 j à 117j) pour le troisième quartile (Figure 24 et Tableau 6).

Les dévalaisons survenant dans la ou les premières journées (< 72 h) après le marquage sont certainement liées à une réponse individuelle face au stress subit par la capture et le marquage (effet post opératoire).

Globalement, ce sont 4.3 % des n=234 anguilles marquées qui ont dévalé dans les 24 h post marquage, 6.8 % dans les 72 h post marquage et 9.8 % dans les 10 j post marquage (Tableau 7). Par la route de l'usine ce sont n=9 anguilles qui ont dévalé jusqu'à l'aval usine en moins de 24h après le marquage (Tableau 7) contre une seule anguille par la route du RCC. Mais dans les 10 j post-marquage, les proportions d'anguilles ayant dévalé par les voies de passages RCC (n=5/23) et usine (n=18/23) restent comparables à celles de la totalité des passages. La dévalaison post-marquage ne biaise donc pas ce résultat.

N=16 (7 % des n=234 individus marqués ; 20 % des n=79 jugées comme ayant dévalé) anguilles argentées ont dévalé jusqu'à 72 h après leur marquage, dont n=10 lors des marquages de novembre 2018 et 2019, et n=6 lors des marquages d'été. N=6 individus étaient au stade FIII lors du marquage, n=5 au stade FIV et n=5 au stade FV.

[Les individus ayant dévalé dans les 72h suivant leur marquage sont : 3046_19, 3046_27, 3064_01, 3085_01, 3088_25, 3118_13, 3136_15, 3175_19, 3175_25, 3253_07, 3265_13, 3328_15, 3119_03, 3377_24, 3406_16, 3429_03]

Le pourcentage d'individus ayant dévalé dans les 72 h post marquage reste stable et inférieur à 8 % de l'effectif marqué annuellement (6 % en 2018, 8 % en 2019 et 7 % en 2020 ; Tableau 7). Les dévalaisons post marquage sont plus importantes pour les journées de marquage en novembre (09/11/2018 et 06/11/2019), après les premières grosses augmentations de débit, que pour les journées de marquage en été. N=12/16 individus ayant dévalé dans les 10 j post-marquage en 2018 et 2019 ont été marqués en novembre. Parmi les n=10 individus ayant dévalé dans les 24 h post marquage, n=8 étaient marqués en novembre, notamment en 2019 lorsque ces individus étaient transloqués depuis le sud du bassin. L'influence du facteur « origine » des anguilles marquées a déjà été observé lors de notre expérimentation test de 2013-2014. Nous avons observé que 63 % des anguilles marquées en provenance du Sud avaient dévalé moins de 24h après le marquage. Malheureusement tous nos marquages d'anguilles provenant du Sud ont été fait en novembre après une forte augmentation de débit, qui pourrait aussi avoir stimuler les anguilles argentées pour dévaler.

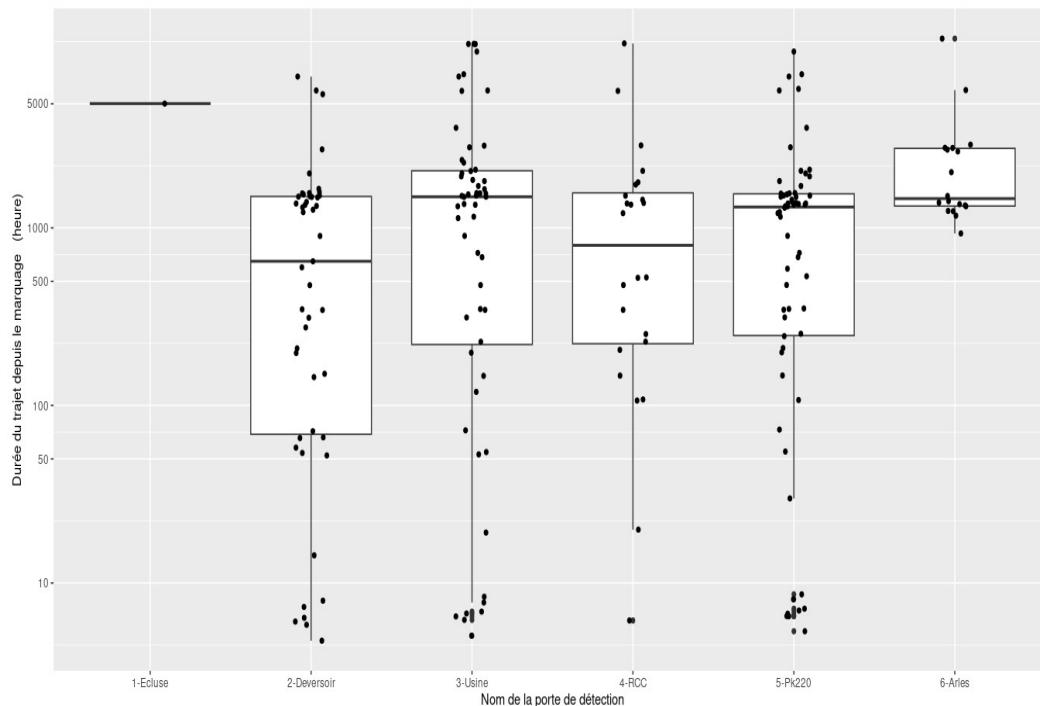


Figure 24 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des durées du trajet (en heure ; échelle Log10) des anguilles ayant franchi l'aménagement CNR de Caderousse entre sept 2018 et avril 2021, depuis la zone de marquage jusqu'à chaque porte de détection. L'heure de détection est, pour une porte donnée, celle de la première détection pour les deux hydrophones quand il y a un hydrophone sur chaque rive du Rhône (toutes les portes du graphique sauf Ecluse et Déversoire). Pour information : 24h = 1j ; 100 h = 4 j ; 1000 h = 42 j.

Tableau 6 : Valeurs Min, Médiane, troisième quartile, Max et effectif des durées (en heures, et en jours pour les valeurs Max) entre le marquage et les différentes portes de détection pour les individus ayant dévalé.

Porte	Nb	Min	Mediane	3°_Quartile	Max
Deversoir	47	8	648	1503	7116 (296)
Usine	56	5	1497	2098	10875 (453)
RCC	24	6	868	1577	10934 (456)
Pk220	62	5	1311	1555	9837 (410)
Arles	18	930	1463	2804	11638 (485)

Tableau 7: Nombres d'anguilles marquées ayant dévalé dans les 24 h, 72 h et 240 h (10 j) après leur remise à l'eau, présentés par année de marquage et par voie de passage. Les données sont issues des détections au Déversoir, Usine, RCC et Pk220. Les chiffres entre parenthèse représentent les individus marqués en novembre. Attention parmi les n=3 individus Usine – 72 h, n=1 n'a pas un passage vérifiable par l'usine, mais a été détecté au Déversoir dans les 72 h après son marquage.

Marquage	Passage						Total par délai			Total
	RCC			Usine			24	72	240	
	24	72	240	24	72	240				
2018		2(1)		2(2)	1(1)	1	2(2)	3(2)	1	6(4)
2019	1(1)		2(1)	6(5)		1(1)	7(6)	0	3(2)	10(8)
2020				1	3	3	1	3	3	7
Total	1	2	2	9	4	5	10	6	7	23

Temps de passage d'une porte de détection à une autre

Dans cette partie nous allons étudier le temps mis par les anguilles en dévalaison entre deux portes de détection successives. Ces estimations nous donneront une idée de la vitesse de déplacement des anguilles.

Les temps de passage d'une porte de détection à l'autre sont relativement court (< 1h) indiquant que les anguilles en dévalaison ne s'arrêtent pas. A part quelques exceptions, celles qui s'arrêtent ne repartent pas. Pour la majorité des individus les tronçons de Rhône entre les portes de détection Déversoir et Usine, entre Usine et Pk220 ou entre RCC et Pk220 sont effectués dans un délai bien inférieur à l'heure (Figure 25 et Tableau 8) et pour 50 % à 64 % des individus à une vitesse au moins égale à 1 m s⁻¹.

Le temps de dévalaison entre le Pk220 et Arles est majoritairement compris entre 15h et 100h (n=11/18 individus). Pour les n=7 individus les plus lents pour arriver en Arles, le temps de déplacement depuis Pk220 varie de 22 j à 93 j (3 mois). Pourtant parmi ces n=7 individus n=3 ont mis 18', 39' et 41' pour aller de Usine à Pk220 et n=2 ont mis 13' et 24' pour aller de RCC à Pk220. Donc ces individus étaient partis comme les autres pour dévaler rapidement. Les n=2 autres, plus lents dès le début, avaient mis 24 h pour faire Usine à Pk220 et 3 j pour faire RCC à Pk220. Cet exemple montre que les anguilles qui dévalent vont généralement vite, autour de 1 m s⁻¹ et plus (plus de 50 % des individus qui dévalent), mais que certaines anguilles peuvent prendre beaucoup plus de temps et arriver tout de même en Arles. Ces n=7 individus plus lents représentent 39 % des anguilles arrivées en Arles.

Compte tenu des distances entre les portes de détection les vitesses moyennes de déplacement des anguilles argentées marquées sont de l'ordre de 1 à 3 m s⁻¹ (on peut estimer que la vitesse moyenne dans le chenal du Rhône est proche de 1 m s⁻¹). Les anguilles seraient donc en nage active dans le courant sur certains tronçons et à certains moments de leur dévalaison mais se laisseraient plus vraisemblablement transporter par le courant à d'autres moments. Il faut aussi intégrer le nécessaire franchissement de deux autres aménagements (Avignon et Beaucaire) qui doit augmenter la durée totale de la dévalaison jusqu'en Arles en impliquant des phases de nage active dans les retenues (donc une fatigue supplémentaire).

Tableau 8 : Résumé des distributions des durées (en heure) et des vitesses (en m s⁻¹) des déplacements des anguilles argentées marquées en 2018, 2019 et 2020 à Mondragon (Vaucluse, 84) dans le Rhône. Les déplacements sont enregistrés entre des portes de détection du Déversoir (amont du mur du Barrage-Usine de Caderousse) et Usine, entre Usine ou RCC et Pk220 et entre Pk220 et Arles (Grand Rhône). Attention toutes les anguilles ne sont pas détectées à toutes les portes de détection.

	Min.	25%	Mediane	75%	Max	Moyenne
Déversoir ==> Aval Usine (3.3 km) – n=37						
Durée (h)	0.3	0.4	0.8	17.7	5843.0	223.6
Vitesse (ms ⁻¹)	2.89	2.20	1.15	0.05	0.00	0.00
Aval Usine ==> Pk220 (2.0 km) – n=45						
Durée (h)	0.2	0.3	0.4	0.7	481.1	18.9
Vitesse (ms ⁻¹)	3.03	1.75	1.33	0.81	0.00	0.03
RCC ==> Pk220 (2.0 km) – n= 18						
Durée (h)	0.2	0.3	0.6	7.7	146.1	14.0
Vitesse (ms ⁻¹)	3.03	2.02	0.93	0.07	0.00	0.04
Pk220 ==> Arles (62.6 km) – n=18						
Durée (h)	14.6	18.8	44.3	837.0	2230.8	499.5
Vitesse (ms ⁻¹)	1.20	0.93	0.39	0.02	0.01	0.03

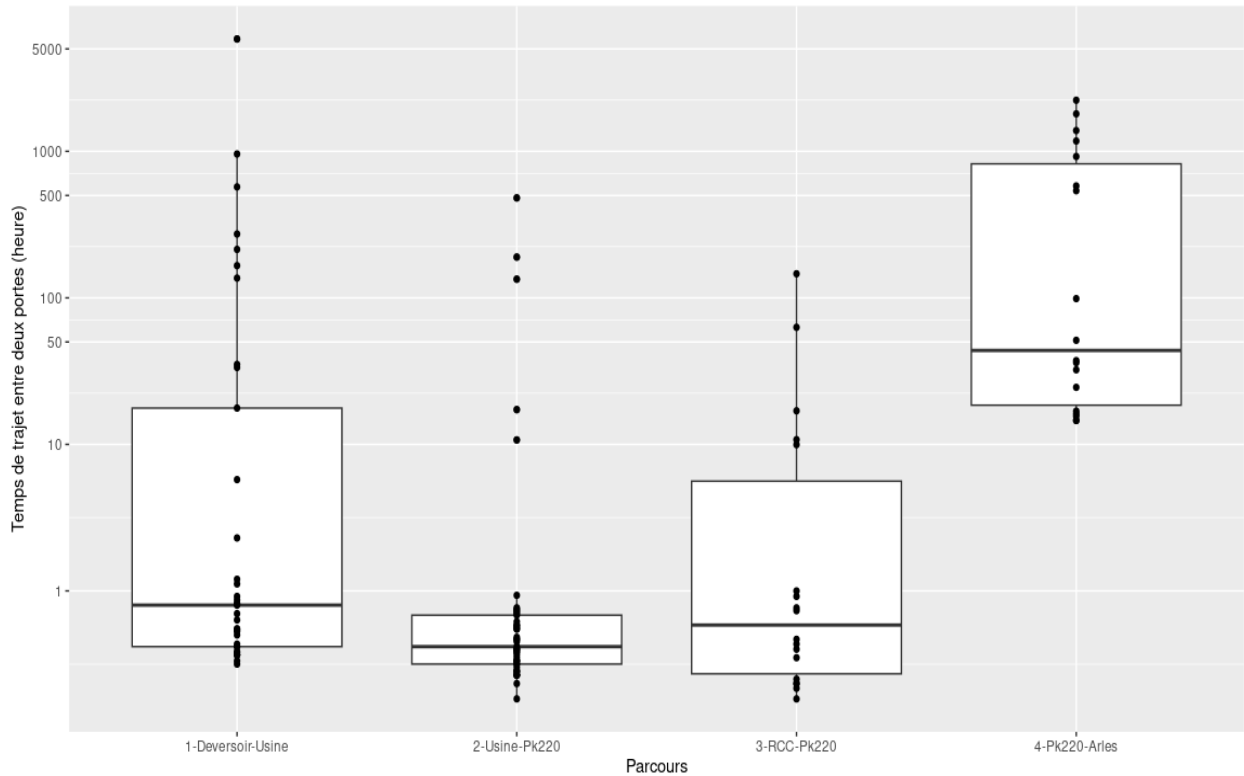


Figure 25 : Distribution sous forme de boxplot (1^{er} quartile-bas du rectangle, médiane-trait noir et troisième quartile-haut du rectangle ; avec points) des temps de trajet (en heure ; échelle Log10) entre porte de détection successives. Pour information : 24h = 1j ; 100 h = 4 j ; 1000 h = 42 j.

Quelques déplacements « hors - norme »

Quelques anguilles argentées marquées ont eu un comportement très original qu'il est intéressant de décrire. Il faut ici supposer que les détections sont certaines et qu'aucune détection n'a été loupée.

3265_13 : Trois jours après le marquage l'anguille est détectée au Déversoir. Puis plus rien pendant sept mois. Là on la trouve dans l'écluse (la seule détection de l'écluse sur toute l'étude). Puis, un mois plus tard au RCC et enfin à Usine. Donc elle serait peut être passée par déversoir / turbines, puis remonté sept mois après dans écluse, avant de mettre 1 mois à redescendre via RCC. Une autre hypothèse moins rocambolesque serait un passage de l'usine suivi d'un arrêt, sans être morte. Puis lors de l'ouverture de la porte aval de l'écluse cette anguille a été détecté par l'hydrophone de l'écluse depuis l'aval de l'usine. Cet individu devait se déplacer dans la zone de l'aval immédiat de l'usine, peut être jusqu'à la restitution, d'où sa détection par RCC, avant une remonté vers l'usine. Malheureusement la détection RCC antérieur à la détection Usine ne permet pas de soutenir cette hypothèse, sauf si l'anguille n'a pas été détecté par Usine avant RCC ; ce qui compte tenu des tests effectués est peu probable. Cette anguille n'a jamais été entendue au PK220.

3088_25 a été entendue au Déversoir le 1^o sept 2018, 3 jours après son marquage, avant d'être entendue au RCC puis au pk220 le 3 septembre (donc en dévalaison). Elle semble avoir refusé de franchir l'usine et elle serait remonté au barrage pour emprunter la route du RCC.

3211_11 a été entendue le 2 novembre 2019 au Déversoir avant de remonter et de passer par le barrage et le RCC le 11 novembre 2019. Enfin, elle a été détectée en RCC et Aval Usine le 14 novembre 2019.

3190_27 a été détectée le 30 octobre 2019 au Déversoir, puis le 6 novembre à l'Aval Usine et enfin le 10 novembre par les deux hydrophone du RCC, puis plus rien, même en suivi mobile. Pour être détectée par les deux hydrophones du RCC à quelques minutes d'écart il faut à priori que l'anguille nage. Cette anguille était soit un peu désorientée, stressée ou en train de mourir.

3048_14 : Cette anguille a été détectée uniquement au Pk220, 9.5 mois après son marquage. Il s'agit bien de la marque de l'anguille puisque cette marque a aussi été contactée en suivi mobile à l'aval de l'aménagement. Cet individu a bien franchi l'aménagement, mais nous ne sommes pas capable de lui attribuer une voie de passage.

3457_01 : cette anguille est un peu dans le même cas que la précédente, mais sans avoir été détecté par les portes de détection. Elle a seulement été contactée à l'aval de l'aménagement lors des suivis mobiles.

Il y a donc deux détections d'anguilles qui prouvent que certains individus ont tout de même pu passer les portes de détection sans être détectées. N=2 sur les n=79 jugées comme ayant franchi l'aménagement représente 2.5 %.

Enfin, il existe des comportements ou des accidents de parcours qui ont fait que n=4 anguilles ont été détectées au Déversoir sans plus jamais être détectées nulle part, ni par les portes de détection, ni par les suivis mobiles [3544_19, 3613_25, 3380_20 et 3429_03].

Les relations dévalaison – débit & température

Dans cette partie les dates de détection de la dévalaison des anguilles argentées à l'aval de l'aménagement de Caderousse sont placées sur un même graphique en fonction du temps (échelle journalière) :

- * les chroniques de débit journalier à l'amont de l'aménagement (Chusclan) et dans le Rhône court-circuité (aval Barrage ; RCC) ;
- * la chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'usine de Caderousse ;
- * l'heure de la première détection de chaque anguille ayant été détectées (n=73).

Nous avons ajouté des symboles qui permettent de savoir si l'anguille détectée à emprunté la route de l'Usine ou celle du RCC. Nous avons également identifié les individus détectés en fonction de leur année de marquage (même si la très grosse majorité des anguilles marquées dévalent dans les mois suivant le marquage). Enfin, nous avons fait un graphe pour chaque année de suivi du 1^{er} mai de l'année n au 30 avril de l'année n+1. Les sessions de marquage de fin août - début septembre et de novembre sont aussi représentées (Figures 26 à 28).

Pour An#1 comme pour An#2, le débit augmente nettement à partir de fin octobre - début novembre pendant que la température baisse fortement. La plupart des dévalaisons sont observées sur la période seconde moitié d'octobre et novembre. Seulement cinq anguilles (2 pendant An#1 et 3 pendant An#2) ont été détectées en dehors des mois de septembre, octobre et novembre.

Il n'est pas possible avec nos données d'identifier si le déterminant principal du déclenchement (stimulus) de la dévalaison est le débit, la température ou l'interaction des deux.

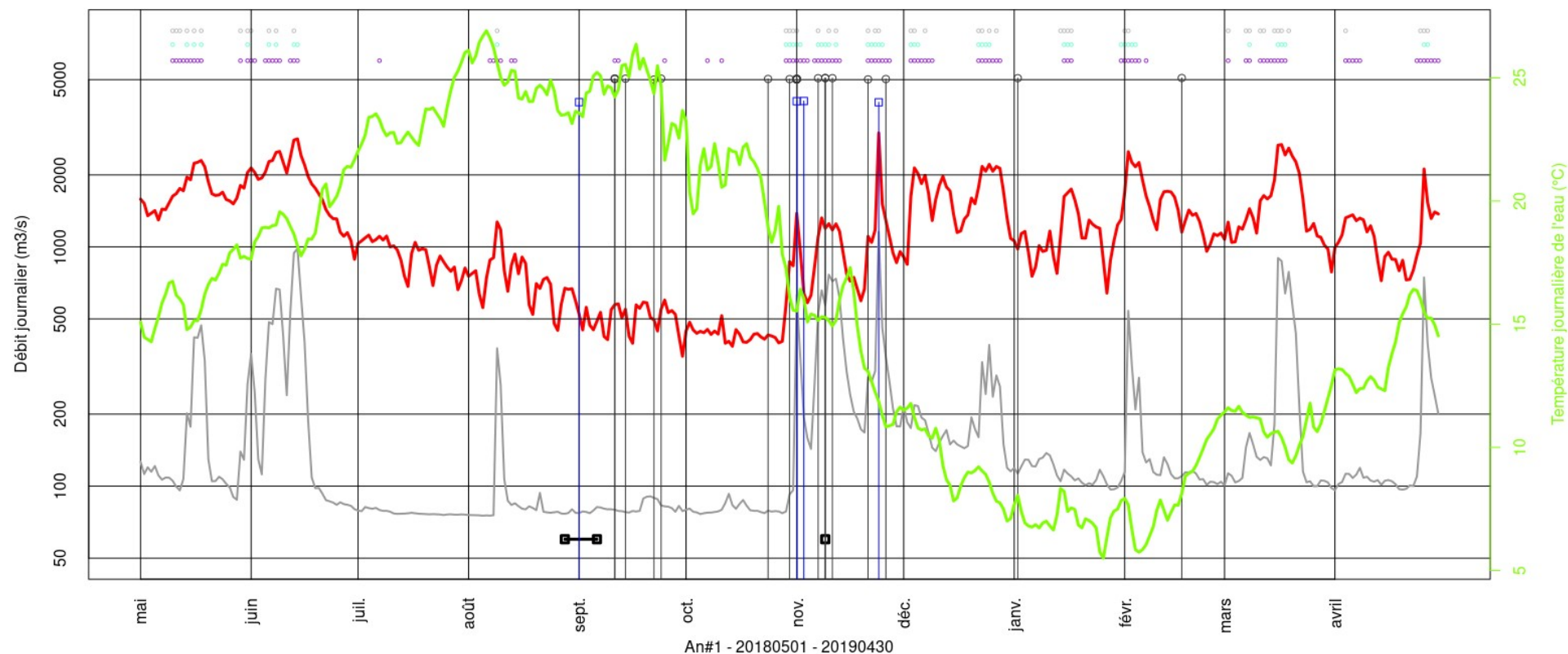


Figure 26 : Date de la première détection des anguilles argentées en dévalaison au cours de la première année du projet DAARAC (An1 : 20180501-20190430, n=24) situées sur la chronique de débit et de température du Rhône à Caderousse (noter que le premier marquage a débuté le 28/08/2018). Chroniques des débits moyens journaliers en amont de l'aménagement de Caderousse (à Chusclan, Pk 208, en rouge), dans le RCC (en gris). Noter l'échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées de gauche correspondant aux débits. Chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'Usine de Caderousse (en chartreuse; axe des ordonnées de droite). Les symboles noirs avec ligne verticale indiquent les passages par la route de l'usine et les symboles bleus avec ligne verticale indiquent les passages par la route du RCC. Les symboles noirs épais en ordonnées = 60 représentent les dates de marquage (28/08/2018 au 06/09/2018 et 09/11/2018). Les séries de ronds violets, bleus et gris au-delà de l'ordonnée = 5000 sont les résultats du Modèle Teichert et al. (2020) à savoir respectivement les classes de migration P95, P75 et P50 avec une probabilité > 0.5 de dévalaison des anguilles argentées pour atteindre 95 %, 75 % et 50 % (respectivement) des nombres annuels d'anguilles argentées modélisés en migration.

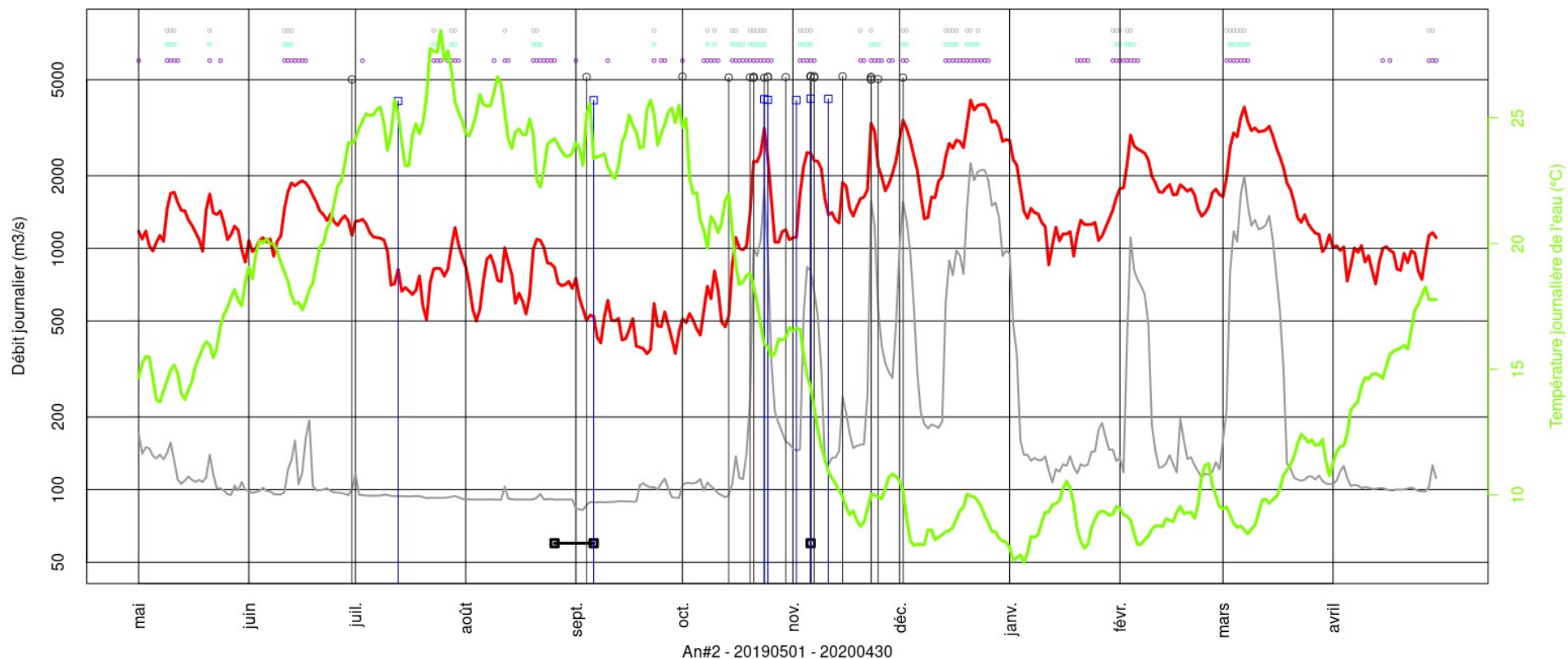


Figure 27 : Date de la première détection des anguilles argentées en dévalaison au cours de la deuxième année du projet DAARAC (An2 : 20190501-20200430, n=32) situées sur la chronique de débit et de température du Rhône à Caderousse (noter que le premier marquage a débuté le 26/08/2019). Chroniques des débits moyens journaliers en amont de l'aménagement de Caderousse (à Chusclan, Pk 208, en rouge), dans le RCC (en gris). Noter l'échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées de gauche correspondant aux débits. Chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'Usine de Caderousse (en chartreuse; axe des ordonnées de droite). Les symboles noirs avec ligne verticale indiquent les passages par la route de l'usine et les symboles bleus avec ligne verticale indiquent les passages par la route du RCC. Les symboles noirs épais en ordonnées = 60 représentent les dates de marquage (26/08/2019 au 06/09/2019 et 06/11/2019). Les séries de ronds violets, bleus et gris au-delà de l'ordonnée = 5000 sont les résultats du Modèle Teichert et al. (2020) à savoir respectivement les classes de migration P95, P75 et P50 avec une probabilité > 0.5 de dévalaison des anguilles argentées pour atteindre 95 %, 75 % et 50 % (respectivement) des nombres annuels d'anguilles argentées modélisés en migration.

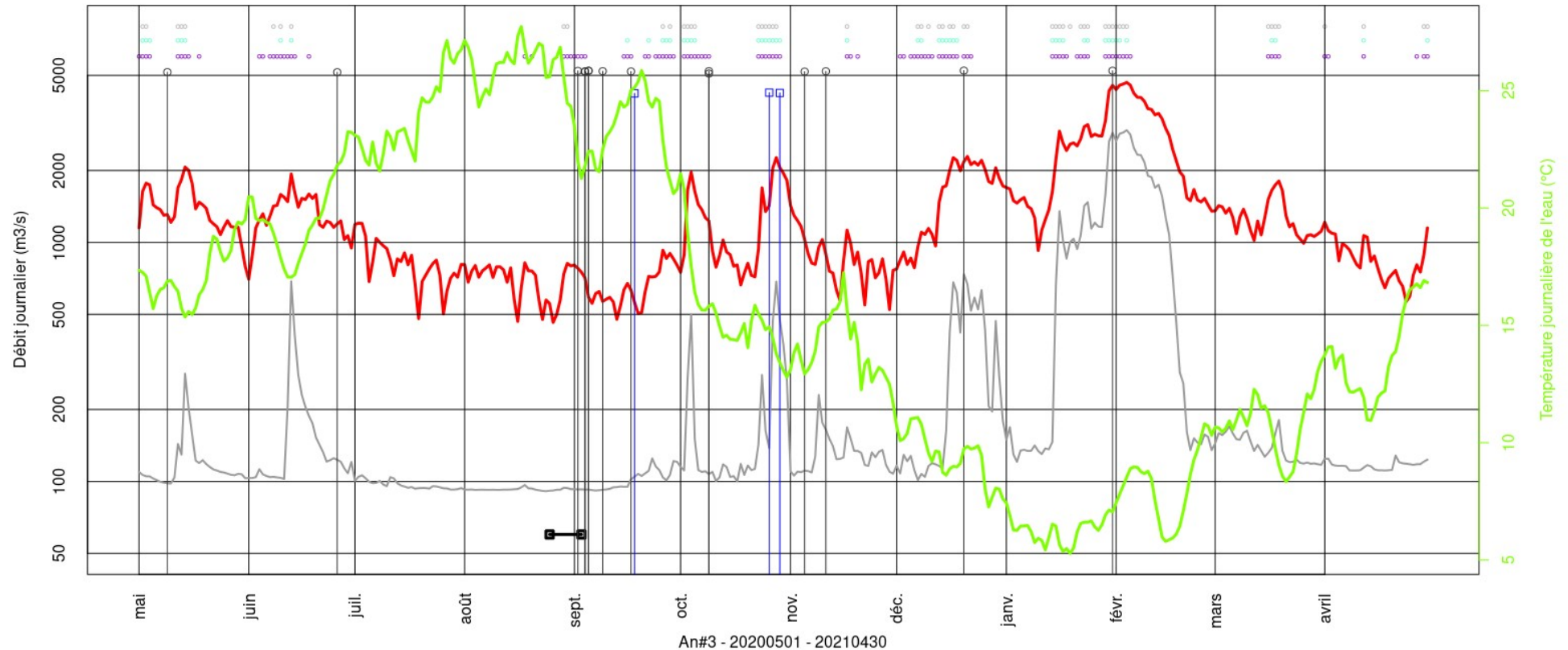


Figure 28 : Date de la première détection des anguilles argentées en dévalaison au cours de la troisième année du projet DAARAC (An3 : 20200501-20210430, n=17) situées sur la chronique de débit et de température du Rhône à Caderousse (noter que le premier marquage a débuté le 25/08/2020). Chroniques des débits moyens journaliers en amont de l'aménagement de Caderousse (à Chusclan, Pk 208, en rouge), dans le RCC (en gris). Noter l'échelle logarithmique pour l'axe des ordonnées de gauche correspondant aux débits. Chronique de la température moyenne journalière de l'eau à l'Usine de Caderousse (en chartreuse; axe des ordonnées de droite). Les symboles noirs avec ligne verticale indiquent les passages par la route de l'usine et les symboles bleus avec ligne verticale indiquent les passages par la route du RCC. Les symboles noirs épais en ordonnées = 60 représentent les dates de marquage (25/08/2020 au 03/09/2020). Les séries de ronds violets, bleus et gris au-delà de l'ordonnée = 5000 sont les résultats du Modèle Teichert et al. (2020) à savoir respectivement les classes de migration P95, P75 et P50 avec une probabilité > 0.5 de dévalaison des anguilles argentées pour atteindre 95 %, 75 % et 50 % (respectivement) des nombres annuels d'anguilles argentées modélisés en migration.

Analyse de la relation entre les simulations du modèle Teichert *et al.* (2020) et nos observations de dévalaison

Teichert *et al.* (2020) ont défini trois classes de migration, P50, P75 et P95 comme les principaux jours de migration nécessaires pour atteindre cumulativement 50 %, 75 % et 95 % des nombres annuels d'anguilles argentées en migration. Bien que les jours P50 et P75 se concentrent mécaniquement sur les migrations intensives, les jours P95 incluent généralement des événements de migration modérée et faible (donc forcément plus nombreux). Pour chaque jour, la probabilité de migration est calculée à partir du niveau de débit du jour (dans la gamme des centiles de la distribution des débits de la rivière étudiée), des variations de débit des jours précédents (1, 3 et 7 jours), le cumul du nombre de jours de fort débit (> centile 0.7) depuis le 01 sept (début de saison de migration) et la phase lunaire (nouvelle, croissante, pleine et décroissante). Si, pour une classe de migration donnée, la probabilité du jour j est > 0.5 alors une migration est possible ce jour là (et sera d'autant plus intense qu'on se rapproche de P50).

Pour notre étude, nous avons effectué les calculs (avec N. Teichert) seulement sur An1, 2 et 3, car il y a trop peu de dévalaison pendant An4 (Figures 26 à 28).

Entre le 28 août 2018 (premier jour de marquage) et la dernière détection, le 11 mai 2021 (tout début An4), 986 jours se sont écoulés. Lorsque la probabilité P50, P75 ou P95 est > 0.5 alors on peut faire l'hypothèse que les conditions de débit sont favorables à la dévalaisons des anguilles argentées. Ainsi sur les $n=976$ jours écoulés nous avons 146 (14,8% des 986 jours écoulés), 143 (14.5%) et 294 (29.8 %) jours avec un stimulus plutôt favorable pour le déclenchement d'une migration vers l'aval (respectivement pour M50, M75 et M95). En considérant simultanément toutes les détections enregistrées autour de l'aménagement de Caderousse et en les comparant aux jours probables de détection, on obtient 52 (67 % des 78 détections au total), 35 (45 %) et 32 (41 %) détections pour des jours avec M95, M75 et M50 valant 1. Le modèle de Teichert *et al.* (2020) ayant été étalonné sur des jeux de données de rivières-fleuves de la façade océanique française, et pour la plupart de gabarit bien inférieur au Rhône aval, ces résultats sont assez extraordinaires. Ils confirment surtout que la variabilité du débit est certainement le critère environnemental principal du déclenchement de la dévalaison, en hiver, avec une température pas trop chaude et plutôt pendant des nuits sombres. Il reste toutefois un nombre important de jours avec une dévalaison observée mais pas prédite. Une mesure des flux d'anguilles dévalantes (guideau, caméra acoustique ou autres) serait une mesure plus adaptée pour être comparée aux prédictions du modèle.

Analyse des débits et températures en moyennes journalières sur les quatre années d'étude (An 1 à 4) en comparaison avec la période 2000-2022

L'analyse consiste ici en une interprétation des graphes présentés dans les Figure 29 à Figure 32.

L'interprétation consiste à comparer la chronique de l'année étudiée (attention ici les années s'étendent du 1° mai au 30 avril de l'année suivante) aux chroniques des valeurs résumant pour chaque jour de l'année les enregistrements de la période 2000-2022 (données CNR). Les chroniques utilisées ici sont celles de la valeur minimale (Min), médiane (Med) et maximale (Max) calculées pour chaque jour de l'année entre 2000 et 2022 (données CNR).

Entre début septembre et fin avril le débit moyen journalier est très variable sur une année et entre les années pour une période donnée.

- An 1 : majoritairement faible, le débit est proche de la valeur min jusqu'à fin octobre. Après une forte augmentation brutale début novembre le débit oscille autour des valeurs médianes jusqu'à fin décembre pour rester ensuite entre les valeurs Min et Médianes (Figure 29). On détecte au moins n=7 fortes augmentations de débit dont n=6 > 2000 m³ s⁻¹ ; La première augmentation de débit de novembre 2018 ne dépasse pas les 2000 m³ s⁻¹ mais partant de valeurs Min elle est jugée importante. Globalement, même lors de ces augmentations, les débits observés lors de cette première année de suivi sont très loin des valeurs Max.

- An 2 : Le débit toujours très variable est toujours faible en fin d'été, jusqu'à fin octobre, puis est plus fort que pour An 1 ensuite. En novembre, janvier et février, il oscille entre les valeurs Min et Médianes, et autour des valeurs Médianes en décembre (Figure 30). On détecte n=7 fortes augmentations de débit, dont une très forte sur la seconde moitié d'octobre. Ensuite n=6 augmentations dépassent 2000 m³ s⁻¹ et pour n=4 dépassent même les 3000 m³ s⁻¹, proches des valeurs Max.

- An 3 : le débit est globalement plus faible que pour An 2, et oscille entre les valeurs Min et Médianes (Figure 31). Seules n=4 grosses augmentations de débit sont enregistrées, au dessus de 2000 m³ s⁻¹, dont une début février 2021 à presque 4700 m³ s⁻¹.

- An 4 : le débit sur cette dernière année de suivi est très bas (proche de valeurs Min) avec cependant n=6 fortes augmentations de débit, dont n=5 dépassent les 2000 m³ s⁻¹ (Figure 32). Ces augmentations de débit surviennent au début des mois d'octobre, novembre, décembre et janvier et un peu plus tard en février et en avril 2022.

Globalement les débits moyens journaliers enregistrés pendant les quatre années d'étude sont plutôt faibles, oscillant entre les valeurs Min et Médianes de la période 2000 - 2022. Les débits estivaux sont franchement très faibles (plutôt proches des valeurs Min des 20 dernières années), parfois jusqu'à fin octobre. Puis, entre novembre et avril se succèdent quelques (n=4 à 7 par an) fortes augmentations de débit qui dépassent 2000 m³ s⁻¹, souvent de peu. Les n=21 augmentations du débit au-delà de 2000 m³ s⁻¹ enregistrées pendant les quatre années du suivi sont les seules occasions (hors travaux à l'usine) pour les anguilles en dévalaison d'avoir une possibilité d'attraction vers le RCC, liée à l'ouverture du barrage de dérivation.

En replaçant nos enregistrements de dévalaison, tout début novembre 2018 on observe une augmentation de débit de + 1000 m³ s⁻¹ et un second pic dans la seconde moitié de novembre associé à des dévalaisons (Figure 26). Ensuite de octobre à mi novembre 2019 on observe beaucoup de dévalaisons et une forte montée du débit fin octobre et début novembre (dans les deux cas > + 1000 m³ s⁻¹ ; Figure 27). Enfin, en octobre 2020 nous avons enregistré quelques dévalaisons et deux fortes montées de débit début octobre (deux évènements > + 1000 m³ s⁻¹ ; Figure 28)

Entre début septembre et fin avril la température de l'eau moyenne journalière est très variable sur une année et entre les années pour une période donnée, même si cette variabilité semble moindre que la variabilité décrite précédemment pour le débit.

L'analyse de la température de l'eau moyenne journalière se fait comme pour le débit moyen journalier, en comparant la chronique de l'année étudiée (attention ici les années s'étendent du 1^o mai au 30 avril de l'année suivante) aux chroniques des valeurs Min, Med et Max calculées pour chaque jour de l'année sur la période 2000-2022 (données CNR).

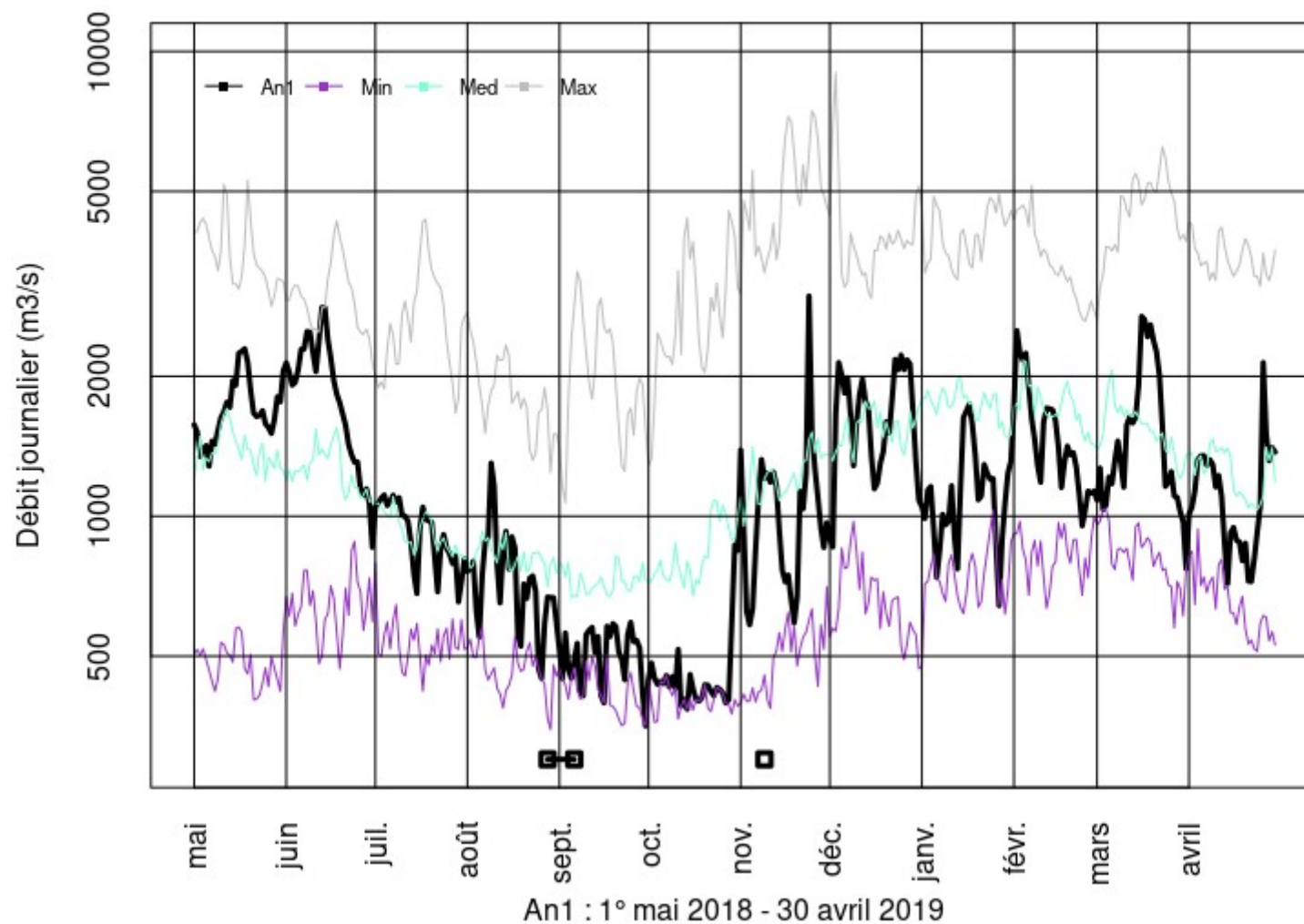


Figure 29: Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la première année d'étude – An 1, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.

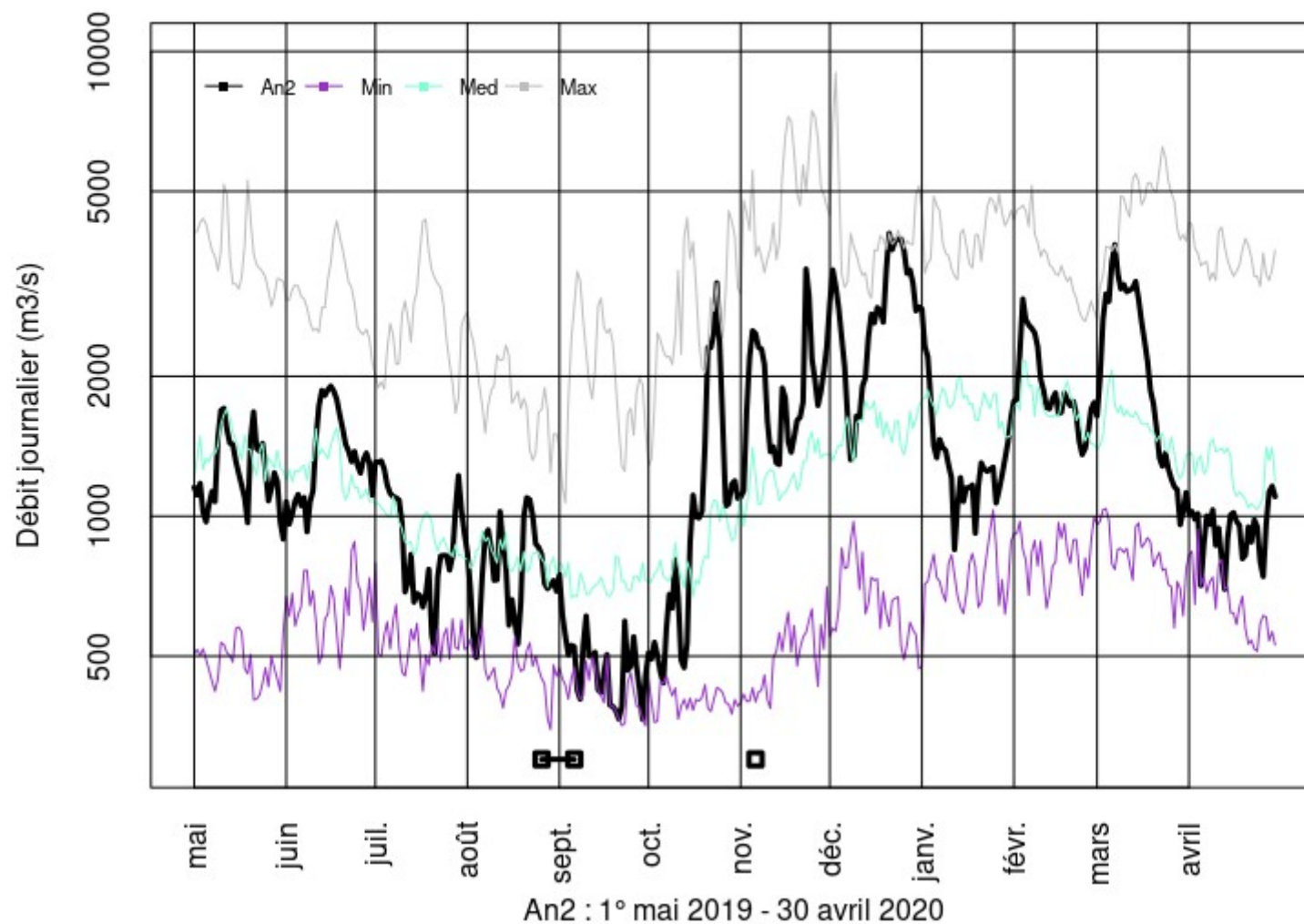


Figure 30 : Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la deuxième année d'étude – An 2, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.

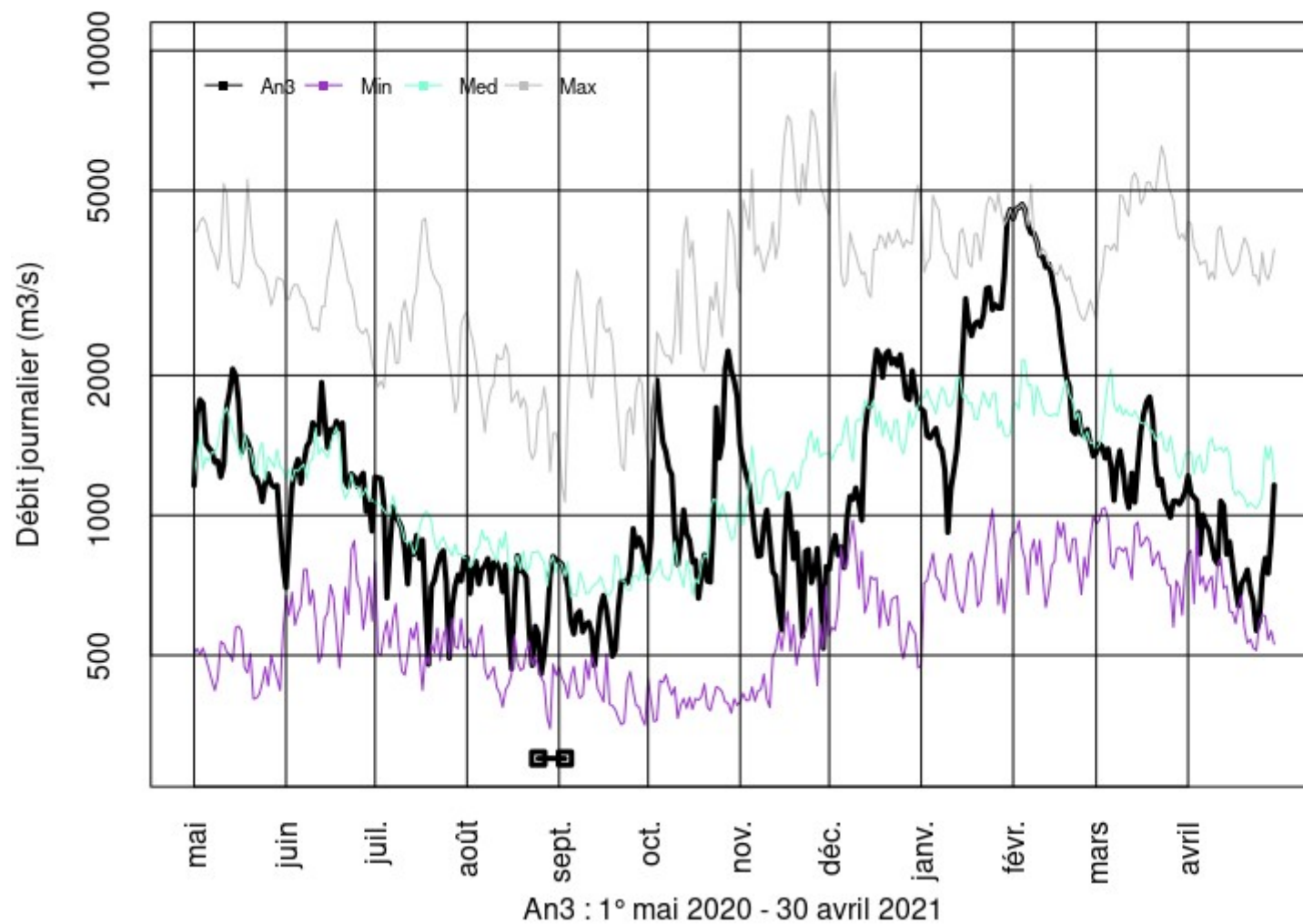


Figure 31 : Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la troisième année d'étude – An 3, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.

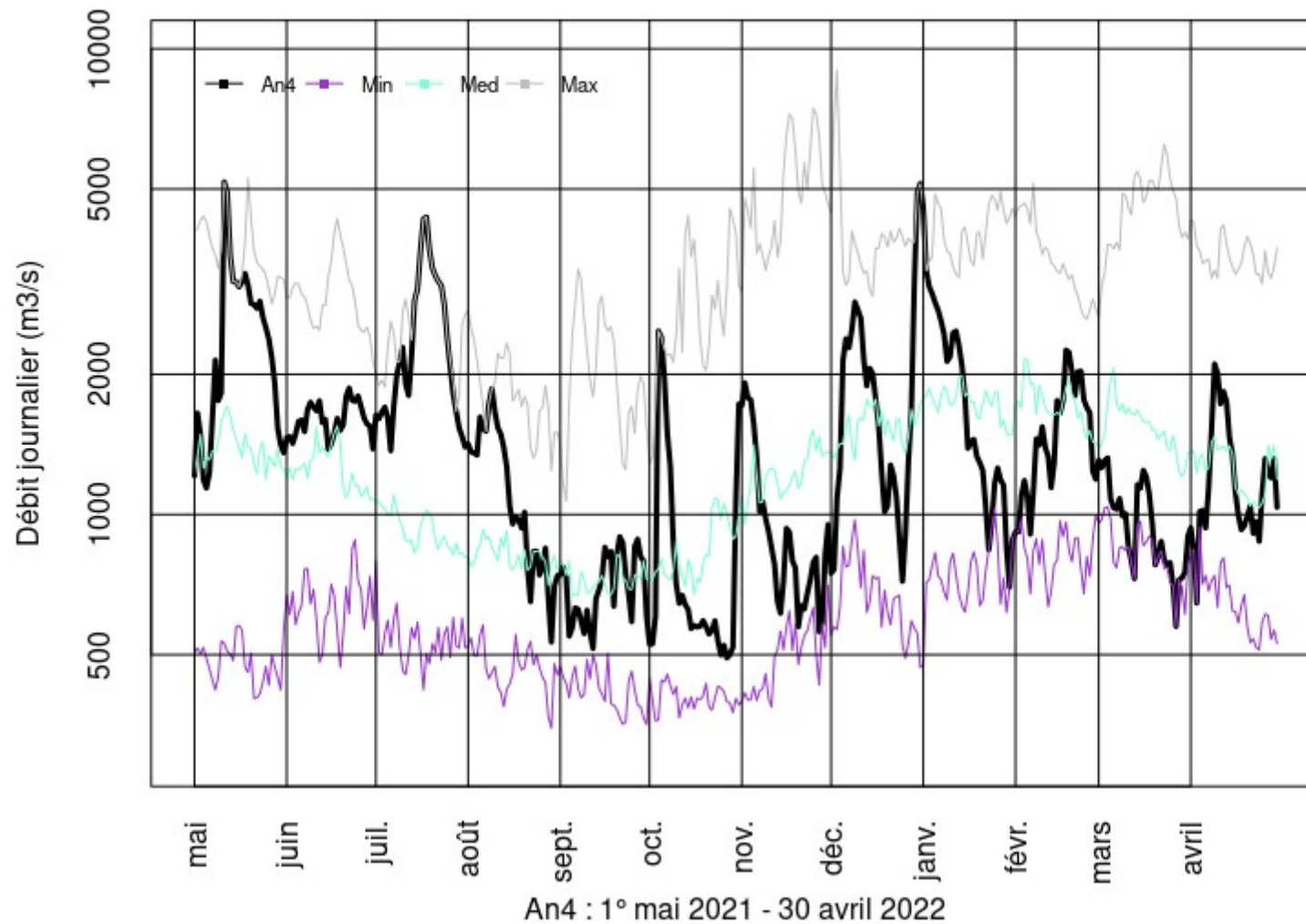


Figure 32 : Chronique du débit moyen journalier à Chusclan (Pk208.06 – retenue Caderousse) pour la quatrième année d'étude – An 4, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2000 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40). Attention l'échelle des ordonnées est en Log.

- An 1 : la température de l'eau baisse de mi septembre à fin janvier en étant supérieure aux valeurs Médianes jusqu'à mi-décembre (Figure 33). Cette baisse connaît toutefois n=3 fortes baisses en quelques jours à la fin des mois de septembre, octobre et novembre 2018. Ensuite la température de l'eau oscille autour des valeurs Médianes, sauf début mars 2019 où elle atteint les valeur Max. Le seuil des 15°C est dépassé à la mi-avril 2019.

- An 2 : la température reste chaude (25°C) jusqu'à fin septembre (valeurs Max). Ensuite la baisse de la température de l'eau est assez brutale (de 25°C à 9°C), en passant en dessous des valeurs Med dès la mi-novembre 2019 (Figure 34). Ensuite la température oscille entre 6°C et 11°C jusqu'à mi-mars, valeurs bien au dessus des valeurs Med, proches des Max en février 2020. Ensuite l'augmentation de température est assez monotone et proche des valeurs Med.

- An 3 : La diminution de la température lors de ce troisième hiver se fait en deux temps après un mois de septembre (très chaud) identique à l'An 2 (Figure 35). Deux baisses très franches de la température, démarrant fin septembre et mi-novembre sont entrecoupées d'un plateau entre mi-octobre et mi-novembre atteignant des valeurs Max sur la première moitié de novembre. A partir de mi-janvier 2021 la température se réchauffe de manière chaotique en suivant trois cycles passant de valeurs Min à des valeurs Max.

- An 4 : à l'image de l'An 2 et 3, l'An 4 enregistre des températures très chaudes (valeurs Max) jusqu'à fin septembre 2021. Ensuite la baisse de la température s'opère jusqu'à mi-janvier et se compose de trois cycles de forte baisse suivi d'une remonté – plateau (Figure 36). Lors de chaque baisse la température passe sous les valeurs Med et lors des remontés elle frôle les valeurs Max. Enfin, excepté pendant la première moitié d'avril 2022, lors de la phase d'augmentation de la température à partir de mi-janvier 2022 la température est très proche des valeurs Max.

Globalement la température de l'eau moyenne journalière baisse d'environ 25°C jusqu'à 5°C entre début septembre et fin janvier. Cette baisse se fait plus ou moins régulièrement avec parfois de brusques chutes de température (cf. début novembre 2019 ou octobre 2020) en moins de 10-15 jours. De fin janvier à fin avril la température de l'eau augmente régulièrement jusqu'à 15-18°C. Les diminutions (hiver) comme les augmentations (fin hiver – printemps) ne se font pas de manière très régulière. De fortes variations se produisent pendant ces périodes. La température de l'eau du Rhône en moyenne journalière à Bollène est globalement plus chaude que les valeurs médianes enregistrées ces 20 dernières années. La fin de l'été (notre période de marquage) est très proche des valeurs Max jamais enregistrées depuis 2000.

En replaçant nos enregistrements de dévalaison des anguilles argentées marquées sur ces chroniques de températures nous pouvons observer que début novembre 2018 le nombre important de dévalaisons observées est concomitant de la fin d'une baisse de température de 22°C à 15°C (Figure 26). De octobre à mi novembre 2019 beaucoup de dévalaisons sont observées en parallèle d'une forte baisse de température de 25°C à 9°C (Figure 27). Enfin, en octobre 2020 les quelques dévalaisons observées se superposent à une forte baisse début octobre (de 21°C à 15°C) puis un plateau autour de 15°C (Figure 28).

Les dévalaisons enregistrées sur le Rhône entre 2018 et 2020 semblent se réaliser lorsque la température baisse significativement en dessous de 20°C, pour atteindre des valeurs autour de 15°C. Les températures observées lors des mois d'octobre et novembre sont plutôt chaudes (entre Med et Max) par rapport aux valeurs enregistrées ces 20 dernières années.

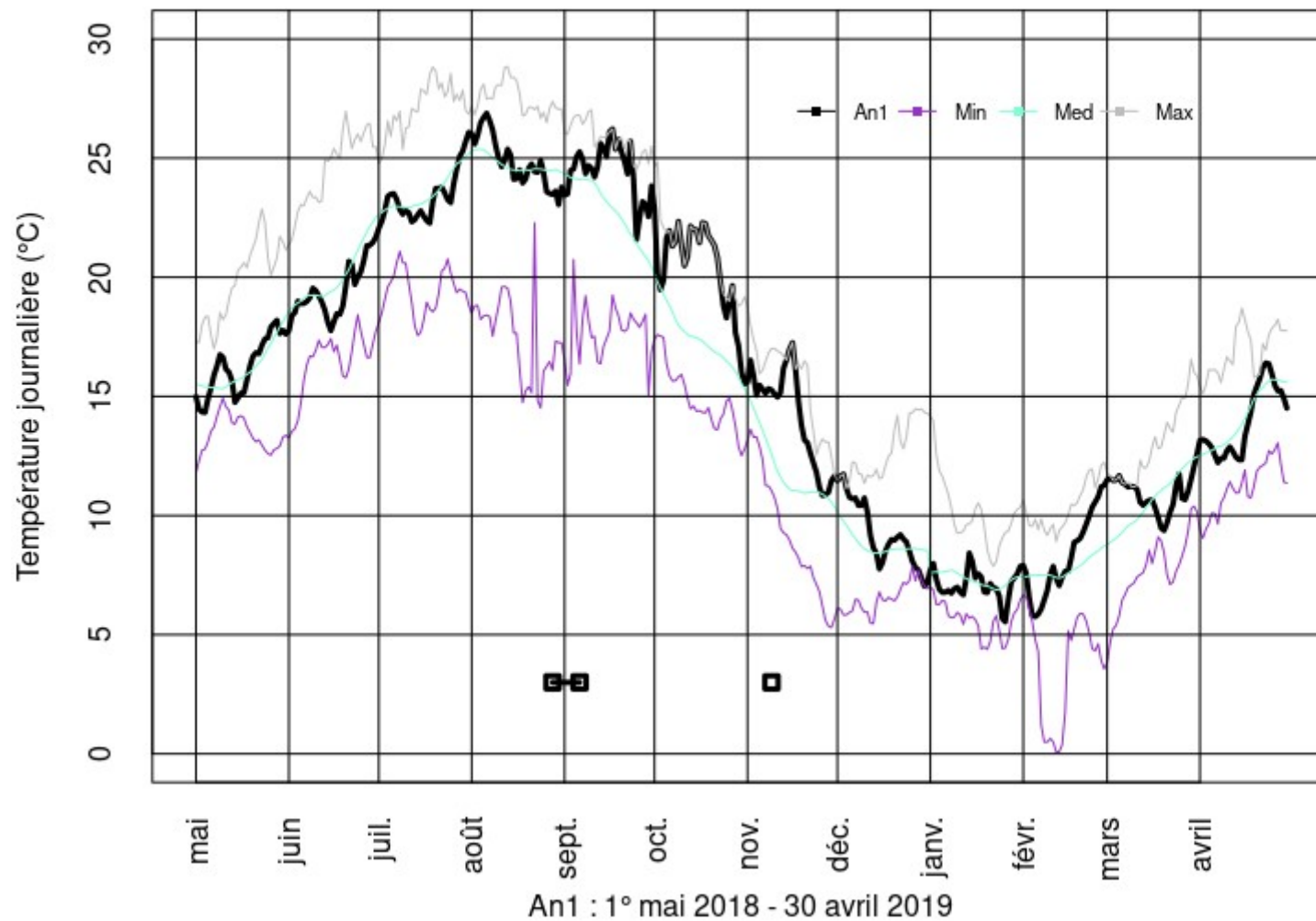


Figure 33 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la première année d'étude – An 1, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).

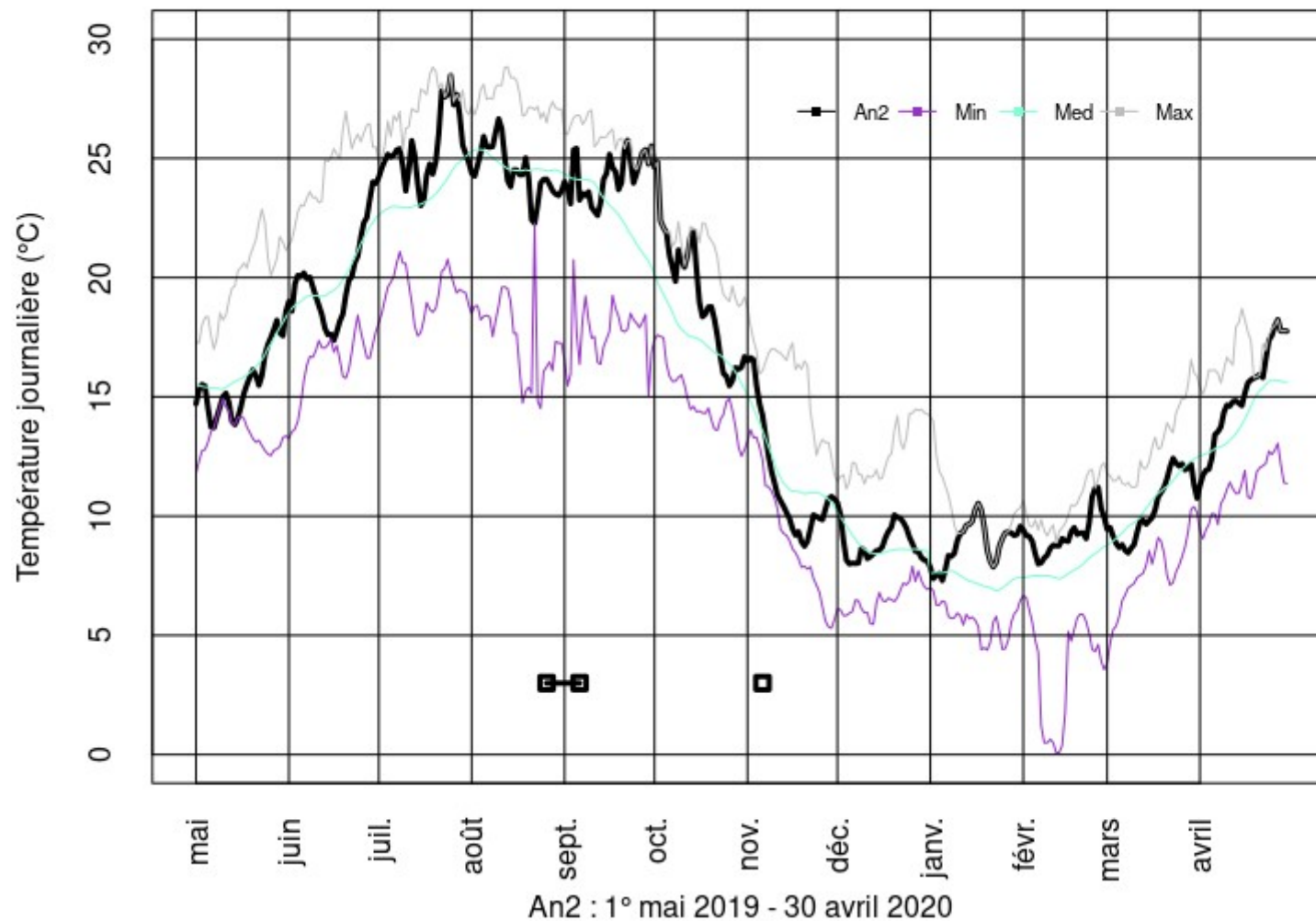


Figure 34 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la deuxième année d'étude – An 2, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).

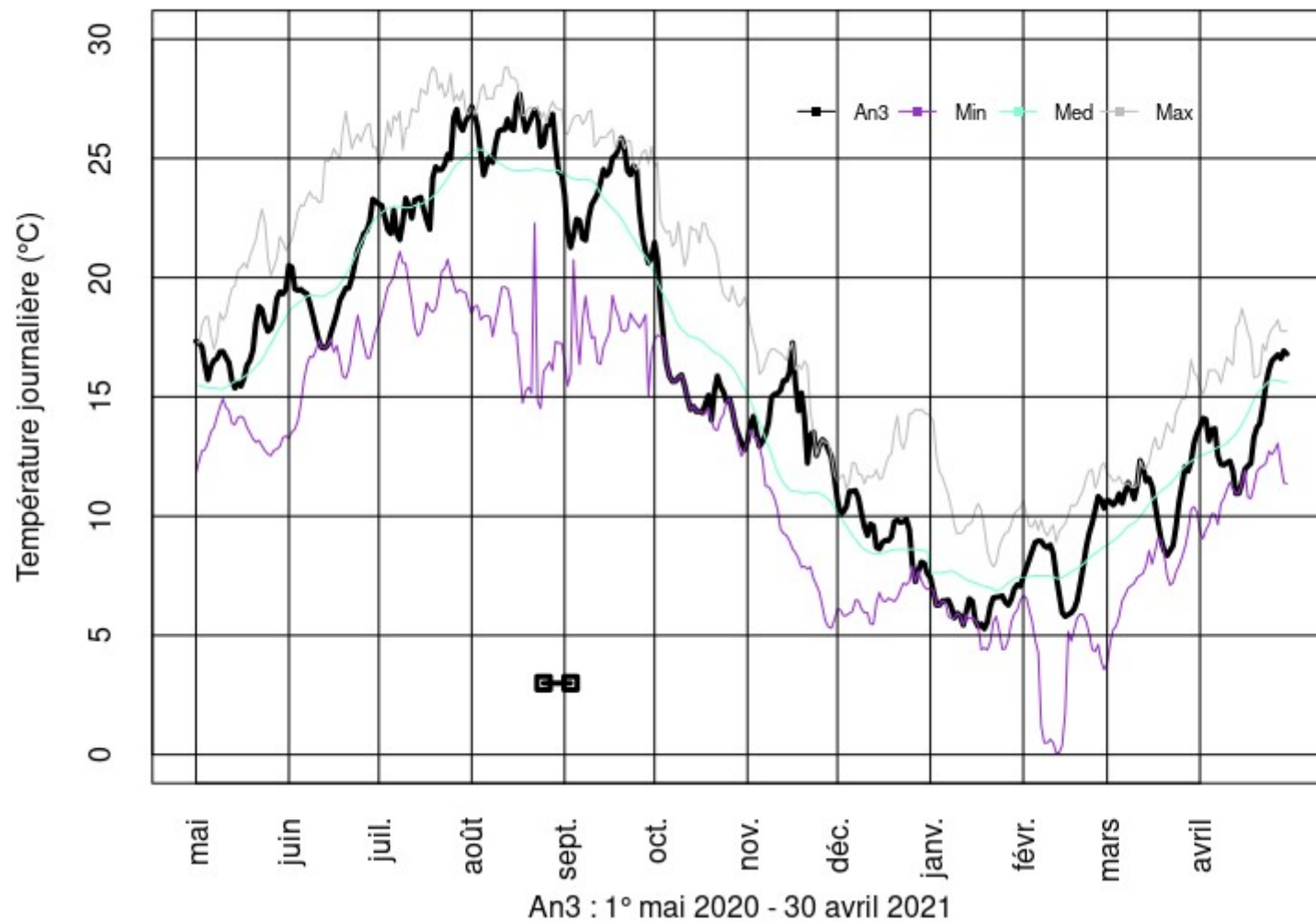


Figure 35 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la troisième année d'étude – An 3, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).

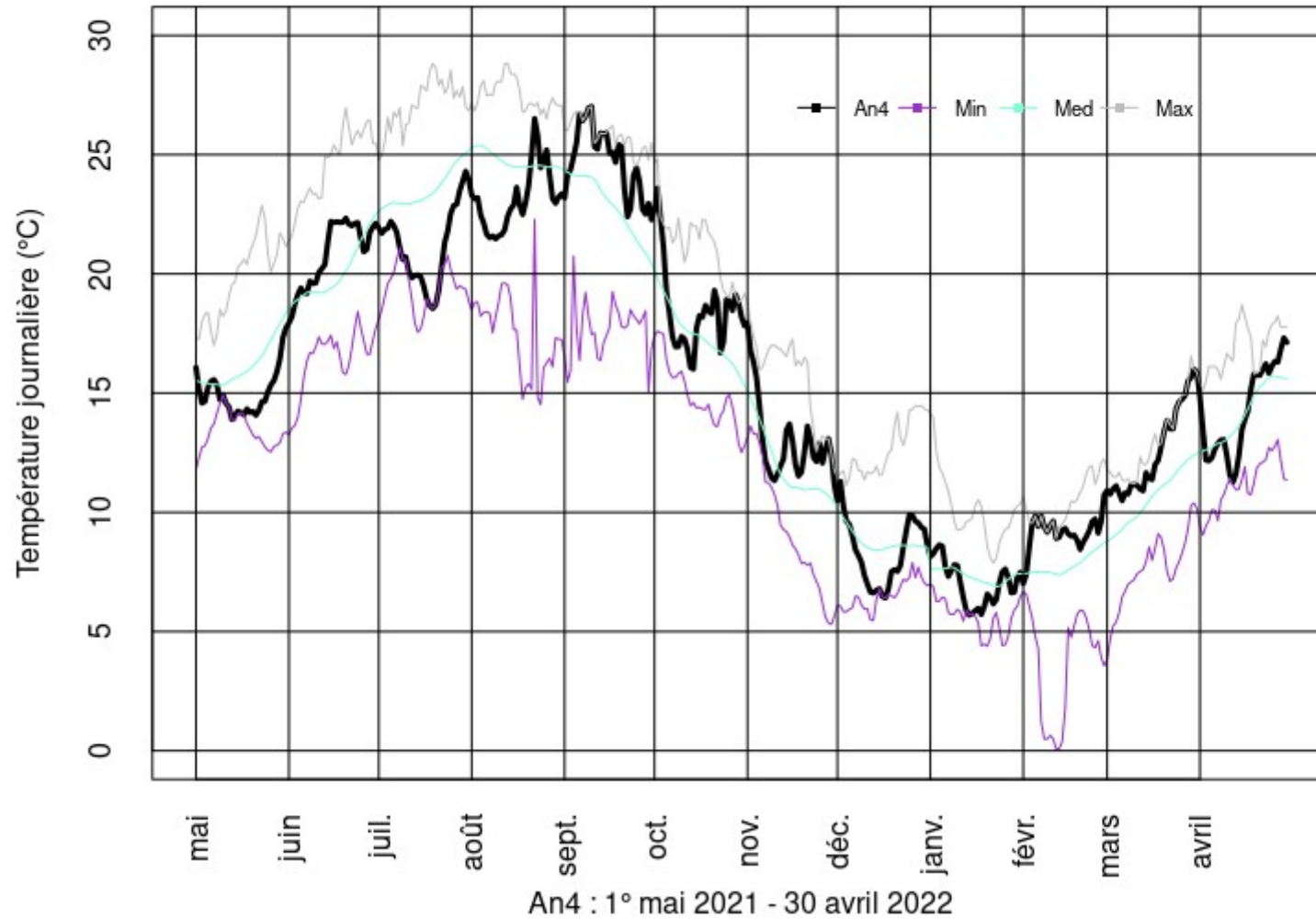


Figure 36 : Chronique de la température de l'eau moyenne journalière à l'écluse de Bollène (Pk187.50 – canal usinier Donzère) pour la quatrième année d'étude – An 4, en noir. Chroniques des valeurs minimum (Min, en violet), médianes (Med, en vert) et maximum (Max, en gris) pour chaque jour de l'année, calculées sur la période 2012 – 2022 (données CNR). Les carrés en bas du graphe sont les dates de marquage des anguilles (Pk200.40).

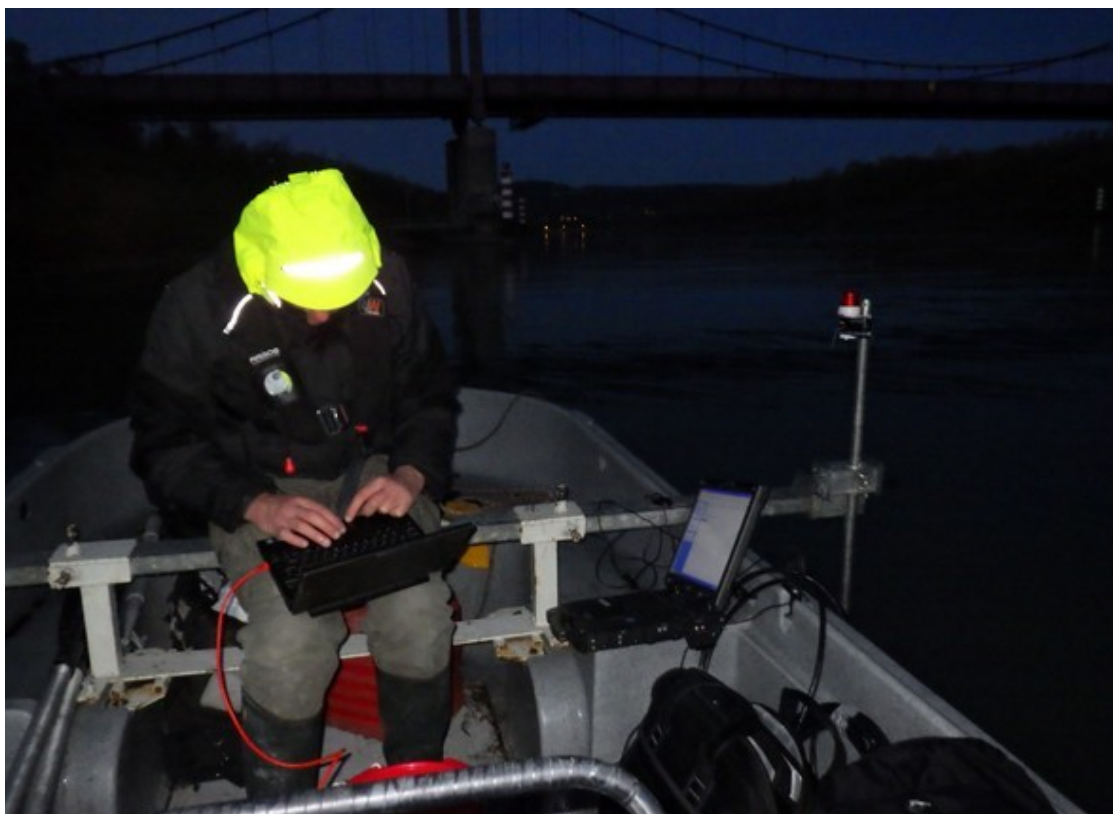


Figure 37 :Présentation de l'installation du matériel à bord du bateau pour les suivis mobiles. En haut vue du bateau avant le départ. La barre métallique en travers du bateau porte à bâbord et à tribord un support d'hydrophone qui est ici relevé pour la navigation et qui sera plus tard immergé. Chaque hydrophone est relié par un câble à un enregistreur qui peut être paramétré directement sur le bateau (bas ; pendant un suivi de nuit)

LES SUIVIS MOBILES

Équipement utilisé

Le principe du suivi mobile est de déplacer le détecteur (hydrophone, câble, enregistreur) en bateau (Figure 37) dans un secteur donné pour enregistrer les signaux sonores de manière active et par conséquent de détecter la présence des individus marqués qui n'auraient pas encore dévalé et seraient normalement restés en amont de l'aménagement de Caderousse et plus particulièrement dans la zone de marquage. Le bateau était équipé d'une barre métallique transversale installée à l'avant, perpendiculairement à l'axe de navigation (Figure 37). De chaque côté de la barre transversale, étaient installés un hydrophone directionnel (cône d'écoute de 30° ; Figure 38). Ainsi chaque hydrophone permet l'écoute des bruits ambiants vers la rive gauche et vers la rive droite.



Figure 38: Hydrophone directionnel qui détecte les signaux à 30 degrés utilisés lors des suivis mobiles opérés en bateau.

Ainsi, lorsque le bateau navigue au centre du chenal, une large portion d'écoute est assurée de chaque côté du bateau, en direction de la berge et du fond. Deux récepteurs portables (Model 395 Portable Acoustic Receiver, Hydroacoustic Technology Inc., Seattle, Washington) sont reliés chacun à un hydrophone par un câble spécifique (Model 690-100 Hydrophone cables). Chaque récepteur portable est connecté à un ordinateur portable qui enregistre, par l'intermédiaire du logiciel Acoustic Tag ©, des fichiers horaires de tous les bruits ambiants. Un GPS Garmin, fixé sur la barre transversale, permet de connaître la position du bateau (précision de quelques mètres). L'ordinateur assure l'enregistrement des signaux sonores et des signaux GPS. Cela permet de faire le lien entre les enregistrements des bruits ambiants, dont les émissions sonores des marques implantées dans les poissons et la position du bateau. Les poissons marqués peuvent ainsi être localisés dans le linéaire du Rhône et en rive droite ou gauche. Pour l'étude présentée ici, seules les coordonnées du bateau seront retenues pour positionner un individu.

Échantillonnages

L'amont du site de marquage a été systématiquement parcouru lors des suivis mobiles sur 5 à 7 km du côté Rhône court-circuité (zone de marquage à Pont St Esprit), sur 5.5 km sur le canal de fuite (jusqu'à la confluence du Lez) et sur 4.5 km après la restitution, jusqu'à l'aval de St Etienne des Sorts (cf. un exemple de prospection Figure 39). Une prospection complète de l'amont de l'aménagement de Caderousse nécessitait environ 4h à 6h (selon le vent et le débit).

L'aval de l'aménagement de Caderousse a également été échantillonné en mobile, de l'aval du Pont routier de la D976 (en amont de Roquemaure) jusqu'à l'usine de Caderousse (8 km) puis tout le RCC, jusqu'au barrage et tout le port de l'Ardoise (6 km). Une prospection complète de l'aval de l'aménagement de Caderousse nécessitait environ 3h à 5h.

Étant donnée la largeur du Rhône et le pouvoir de détection du système de télémétrie mobile (environ 200 m), deux passages ont été fait sur le canal de fuite de Caderousse et à l'aval des restitutions de Donzère-Mondragon (Bollène) et Caderousse (largeur > 200 m). Le premier à environ un tiers de la largeur plutôt en rive gauche et le deuxième à deux tiers de la largeur du côté de la rive droite. Lors que le débit (et surtout les vitesses de courant) et le vent le permettait les détections étaient faites de l'amont vers l'aval le long d'une rive et de l'aval vers l'amont pour l'autre. Sinon, chaque rive était échantillonnée de l'amont vers l'aval. Les anguilles de grande taille sont supposées vivre principalement en berge. L'échantillonnage du centre du chenal n'était donc pas l'objectif de ces échantillonnages mobiles, même si l'orientation de l'hydrophone orienté vers le chenal et sa sensibilité permettaient de détecter un individu au centre du chenal. Seuls les portions de Rhône court-circuité et le canal de fuite de Donzère-Mondragon (Bollène) ont été parcourus en une seule fois (largeur < 200 m), de l'amont vers l'aval.

Les prospections mobiles ont été majoritairement effectuées de jour et à l'amont (n=17 ; Tableau 9), l'objectif principal étant de contacter les individus marqués n'ayant pas dévalé au moment de la prospection. Ces suivis représentent 55 % (17/31) de tous les suivis mobiles effectués. Le nombre de prospections mobiles de jour à l'amont varie de 3 à 6 par année de suivi (Tableau 9). Quelques prospections ont été effectuées à l'aval de l'aménagement de Caderousse (n=4 de jour ; Tableau 9) dans l'idée de détecter les individus ayant franchi l'aménagement avant de stopper leur dévalaison (mort, arrêt...). Enfin, certaines prospections ont été effectuées de nuit (n=4 à l'amont et n=4 à l'aval), la nuit suivante d'une prospection de jour, sous l'hypothèse que les anguilles étant plus actives la nuit il serait plus facile de les détecter.

A noter que nous avons effectué deux suivis mobiles dits « fixes ». Il s'agissait en fait de déplacer un hydrophone (donc il s'agit bien d'une prospection mobile) mais à pied et uniquement dans les enrochements autour de la zone dans laquelle les anguilles ont été relâchées après marquage. La petite zone échantillonnée (environ 150 m de linéaire d'enrochement de part et d'autre du point de remise à l'eau des anguilles marquées) justifie le dénominateur de « fixe ». Ces suivis ont été mis en œuvre en 2021 et 2022 pour augmenter nos chances de contacter des individus marqués, en espérant contacter plus spécialement les individus cachés derrière les blocs et donc peu détectable depuis le centre du chenal.

Le post-traitement de l'ensemble des fichiers horaires enregistrés lors de l'ensemble des suivis mobiles de 2018 à 2022 a été fait de manière manuelle en visualisant chaque fichier enregistré lors des prospections mobiles. Le temps de traitement d'un fichier horaire, très dépendant du « bruit ambiant » est d'environ 30 min en moyenne (cette durée peut être deux à quatre fois plus grande pour un fichier très bruyant). Le résultat du post traitement d'une prospection mobile est une liste d'identifiants d'anguilles (période d'émissions de la marque – autour de 3 sec + sub code) avec un couple de coordonnées XY de la localisation du bateau au moment ou le contact a été jugé le plus proche lors du post-traitement.

Tableau 9: Synthèse des suivis mobiles effectués sur l'ensemble du projet. Amont = secteur autour de la zone de remise à l'eau des anguilles marquées (amont de l'aménagement de Caderousse). Aval = aval de l'aménagement de Caderousse.

Localisation		Nb total	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Amont	jour	17	3	4	6	4
	nuit	4	0	0	2	2
	Fixe	2	0	0	1	1
Aval	jour	4	0	0	2	2
	nuit	4	0	0	2	2
Nb total		31	3	4	13	11

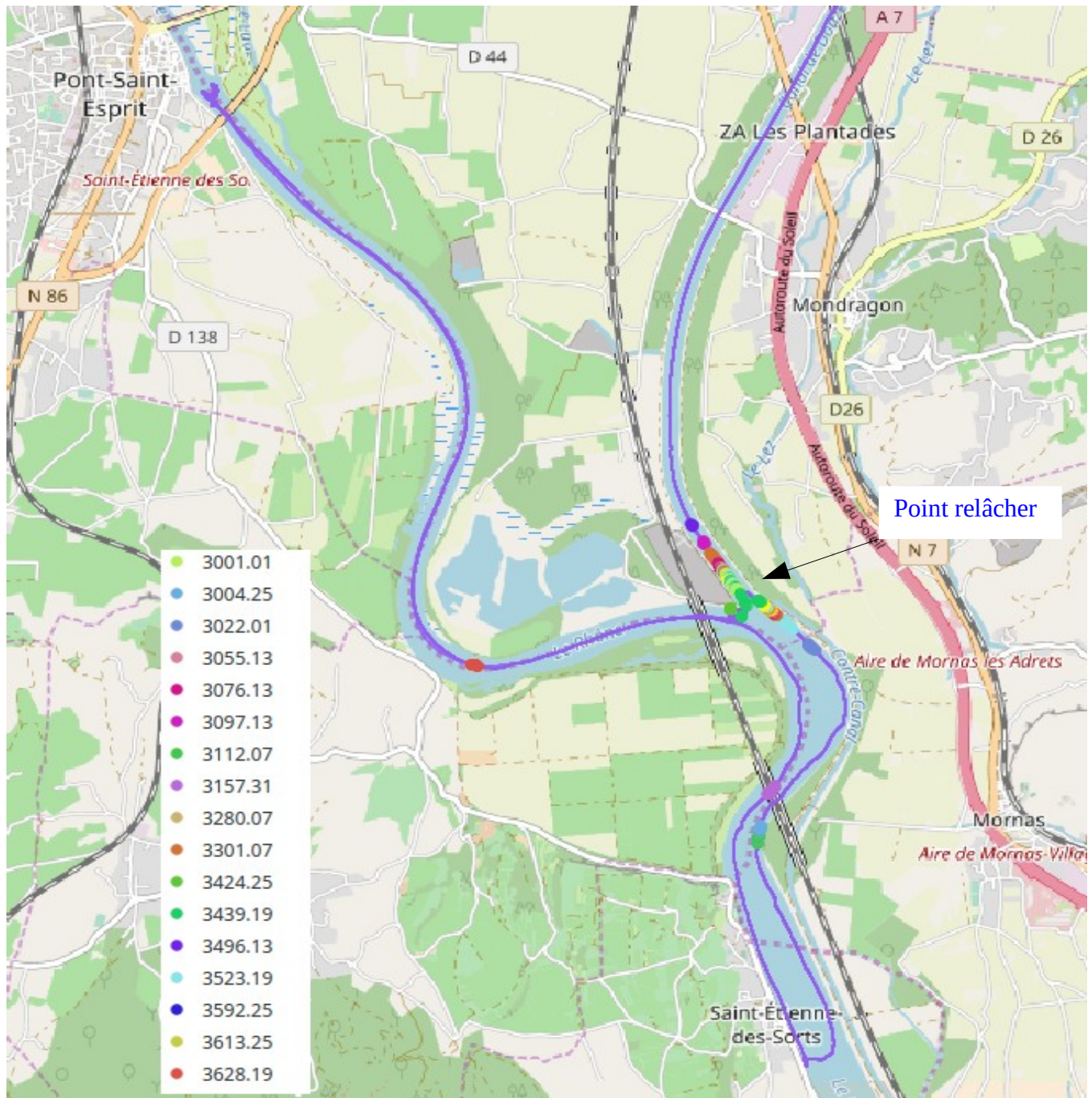


Figure 39 : Exemple de résultat pour un suivi mobile. Projection sur un fond de carte Open Street Map (OSM) des détections des anguilles marquées représentées par des points de couleur. Chaque anguille est identifiée par sa période (4 chiffres, en msec) et son subcode (2 chiffres, en msec) séparés par un point. Le trait violet correspond à la trace du bateau lors du suivi mobile. L'ensemble des cartographies issues du post traitement des données enregistrées lors des prospections mobiles (amont et aval, de jour et amont de nuit) sont présentées en Annexes. Les cartographies pour les prospections de nuit à l'aval étant très comparables aux cartographie de jour, seules ces dernières sont présentées.

Résultats des prospections mobiles

Mobiles à l'amont de Caderousse

Sur n=234 individus marqués, n=102 individus (soit 44% des individus marqués) ont été contactés au moins une fois en mobile à l'amont (de jour ou de nuit). Le nombre d'individus contactés chaque année du suivi était de n=23 pour An1, n=54 pour An2, n=61 pour An3, n=37 pour An4 (un même individu ayant pu être contacté plusieurs années). Il y a eu au total 421 contacts individuels sur les quatre années de suivi à l'amont.

Le nombre total d'individu par mobile à l'amont a varié de 8 à 32 ind. avec une moyenne de 21.3 ind. par prospection (Figure 40). Le nombre d'individus contactés à l'amont diminue toujours entre deux marquage et ce de manière assez homogène. Quelque soit l'effectif total d'anguilles marquées présentes dans le milieu, le nombre d'individus contactés en mobile diminue de manière similaire. Le nombre d'individus contactés à l'amont la première année est plutôt faible, et diminue pourtant de moitié entre la première et la deuxième prospection. L'arrêt de certains émetteurs et le fait qu'en 2020 seulement n=59 individus ont été marqués, le nombre de détections par prospection mobile tend à décroître sur les deux dernières années pour atteindre en fin de quatrième année des effectifs proches de ceux de la première année (Figure 40). Pourtant les effectifs d'anguilles marquées susceptibles d'être présentes autour de la zone de marquage ne cesse de croître n=59 pour An1, n=117 pour An2 et n=176 pour An3 et après (cf. les calculs ci-après). Les émetteurs ont peut être des durées de vie in situ moins longues que la durée théorie du constructeur. Mais cela concernerait vraiment beaucoup de marques, ce qui n'a pas été observé lors des expérimentations précédentes (e.g. Capra et al., 2018). En effet, le nombre d'individus contactés en fin de deuxième année variait entre n=21 et n=26 selon les prospections (Figure 40) pour n=117 individus marqués sensés être présents en amont de l'aménagement. En fin de troisième année les effectifs contactés étaient toujours autour entre n=23 et n=25 (Figure 40) pour n=176 individus marqués sensés être présents en amont de l'aménagement. Même si lors de cette troisième année la baisse rapide des effectifs contactés après mars pourrait venir de l'arrêt des marques implantées en automne 2018, il n'en reste pas moins que plus de 100 individus devaient être présents à l'amont avec un émetteur actif, en tout cas en théorie.

[n=84 marquées en 2018 – n=25 détectées en aval ⇒ n=59 restant en amont, + n=91 au second marquage (2019) – n=33 détectées en aval ⇒ n= 117 restant en amont (normalement aucun émetteur n'aurait du s'arrêter), + n=59 marquées en 2020 – n=19 détectées en aval ⇒ n= 176 (normalement aucun émetteur n'aurait du s'arrêter avant le 01/03/2021, pour les n=59 individus restés en amont depuis l'automne 2018, exceptés ceux des n=9 mâles et des n=2 femelles marquées avec des Tags LF en 2019 et des n=2 femelles marquées avec des Tags LF en 2020].

Le nombre total de contacts par individu à l'amont varie de 1 à 21 (moyenne = 4.4 contacts par individu) pour un nombre total de prospections de n=21. N=34 individus (33 % des n=102 individus contactés) n'ont été contactés qu'une seule fois, n=10 individus (10 %) ont été contactés dix fois ou plus au total lors des prospections à l'amont. Par année de suivi, plus de 50 % des individus détectés en prospection de jour, l'ont été une ou deux fois au maximum et plus de 80 % l'ont été trois fois au maximum (Figure 41). Même si le nombre de prospections de jour a varié de 3 à 6 par année de suivi, les individus présents ne sont pas toujours contactés.

N=12 individus ont été contactés par mobile en amont de jour avant de dévaler pour franchir l'aménagement.

Pour l'anecdote :

- n=2 individus (3001.01 et 3274.01) ont été contactés par mobile en amont de jour et en aval après leur franchissement (respectivement n=4 et n=2 fois).
 - les individus 3364.27 et 3445.07 ont été contactés par mobile de jour à l'amont respectivement 18 et 17 jours avant de dévaler.

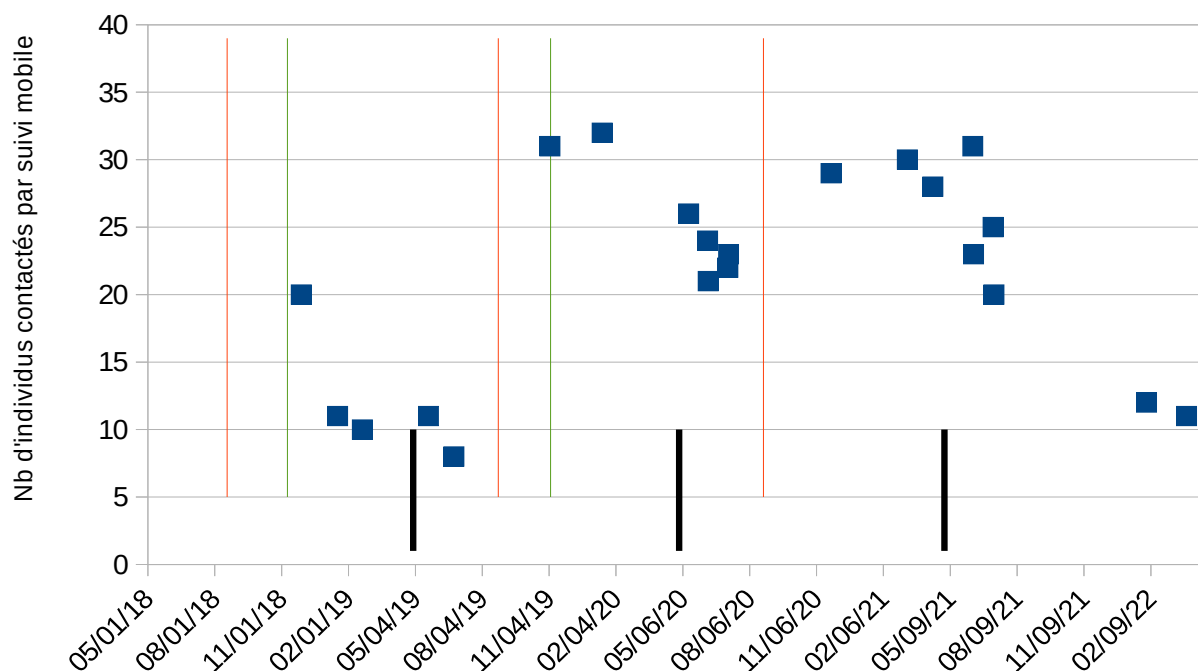


Figure 40: Nombre d'individus contactés par mobile à l'amont (de jour et de nuit) de l'aménagement de Caderousse en fonction de la date du suivi mobile. Les barres verticales noires représentent les fins d'années "biologiques". En rouge (fin été) et vert (novembre) sont présentées les dates de marquage de 2018 (n=84 ind.), 2019 (n=91 ind.) et 2020 (n= 59 ind.). Les dates sont données en mois, jour, année.

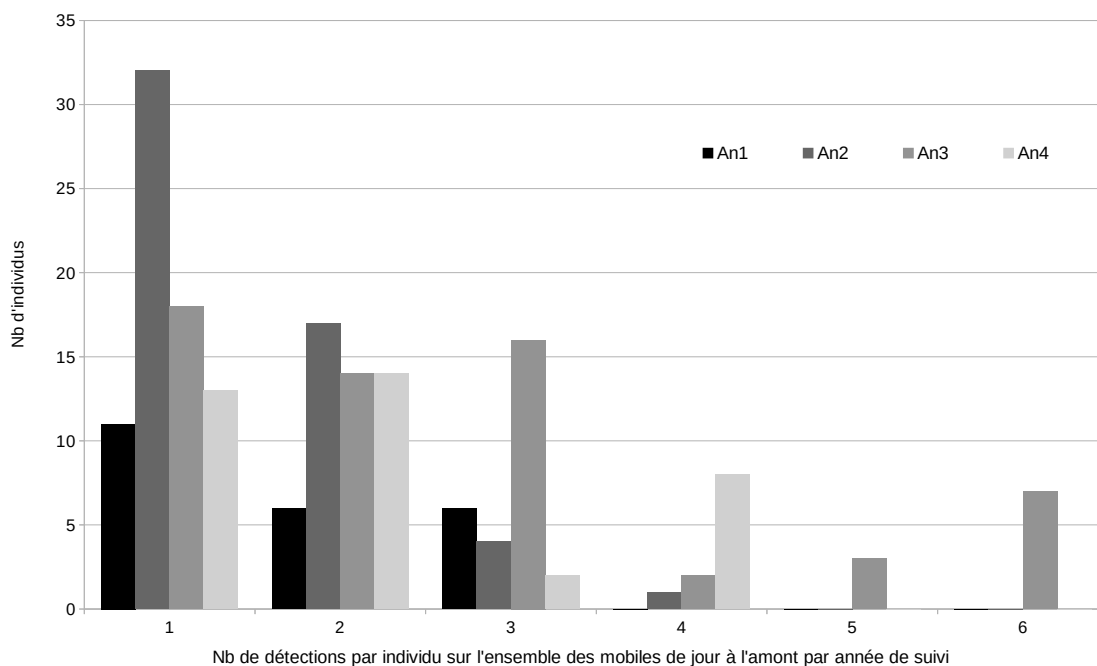


Figure 41 : Distribution du nombre de contacts par anguille marquée contactée au cours des suivis mobiles de jour effectués à l'amont (autour de la zone de marquage) sur les quatre années d'étude (An1, n=3 suivis ; An2, n=4 suivis ; An3, n=6 suivis et An4, n=4 suivis)

Mobiles à l'aval de Caderousse

N=5 anguilles marquées ont été contactées à l'aval lors des n=8 suivis mobiles (n=4 de jour et n=4 de nuit). Parmi ces individus, n=3 étaient passés par l'usine au moins six mois auparavant. Cela suggère pour ces trois individus que le passage de l'usine a stoppé leur dévalaison. Pour les deux autres, il n'est pas possible de connaître leur voie de passage. L'une a été détectée seulement au pk220 (3048.14 ; contactée en mobile n=2 fois à l'aval de jour (et n=2 fois de nuit), un mois puis deux mois après une détection au Pk220). Les contacts mobiles étant situés en amont du Pk220 (cf cartes en Annexe), il est possible d'imaginer que cette anguille n'est pas morte mais qu'elle a stoppé sa dévalaison. L'autre (3457.01; contactée n=2 fois de jour et n=2 fois de nuit à l'aval en 2021) n'a jamais été détectée lors de sa dévalaison. Nous avons donc n=2 individus qui n'ont pas été détectés par les portes Usine ou RCC et n=1 individu non détecté par Pk220. Mais comme toutes les autres anguilles détectées étaient passées par l'usine, on suppose qu'elles sont aussi passées par l'Usine

Mobiles à pied

Les deux mobiles effectués à pieds le long des enrochements de la zone de remise à l'eau des anguilles marquées, n'ont pas permis de détecter des individus n'ayant pas été détectés en suivi mobile. Les n=18 anguilles contactées au cours de ces deux recensements ont toutes été contactées au moins une fois en mobile et n'ont jamais dévalé ensuite.

Différences Jour – Nuit

N=4 mobiles ont été réalisés de jour et de nuit (d'affilé) en amont et en aval (le lendemain). Les prospections mobiles à l'aval n'ayant pas permis de contacter beaucoup d'individus, ils ne sont pas utilisés pour cette comparaison. De plus les quelques individus contactés en aval l'ont été de jour ET de nuit.

Le nombre d'individus différents entre le jour et la nuit suivante est de n=7, 3, 12 et 5 pour respectivement juin et juillet 2020 et juin et juillet 2021 (avec respectivement n= 24/21, 22/23, 31/23 et 25/20 individus contactés de jour/de nuit). Donc globalement nous avons contacté plus d'individus le jour que la nuit (sauf en juillet 2020 à un individu près) et le nombre d'individus différents entre le jour et la nuit est toujours de l'ordre de grandeur de la différence du nombre de contacts entre jour et nuit. Par exemple pour 20200609, n=5 individus étaient contactés le jour mais pas la nuit contre n=2 individus contactés la nuit mais pas le jour. Et pour 20210609 ce sont respectivement n=10 et n=2 individus. Donc globalement les prospections mobiles de nuit n'apportent pas significativement plus de contacts que les prospections de jour.

Les analyses des résultats des prospections à l'aval de l'aménagement et des différences jour vs nuit justifient de s'intéresser principalement aux prospections de l'amont et plutôt de jour.

Analyse des déplacements des individus contactés en amont de l'aménagement de Caderousse

Pour analyser les données des suivis mobiles d'intérêt (uniquement les mobiles de l'amont) permettant d'évaluer les déplacements des individus qui se sont déplacés entre leur différents contacts, nous avons d'abord séparé les individus "immobiles" (exemple Figure 42) des individus "mobiles" (exemple Figure 43).

Pour être conservatif à propos du statut de « mobile » pour un individu, si nous supposons naviguer à 100 m de la berge lors d'une prospection mobile, alors avec un hydrophone directionnel à 30°, nous « observons » la berge sur environ 60 m (80 m si à 150 m de la berge). Donc toute localisation à moins de 200 m d'une autre sera considérée comme identique (i.e. sans déplacement significatif par rapport au contact précédent).

Parmi les n=102 individus contactés en mobile à l'amont n=68 individus ont été contactés au moins deux fois de suite et n=42 ont bougé de moins de 200 m en moyenne entre deux contacts. Les distances moyennes (resp. maximum) individuelles entre deux contacts varient de 0.04 km à 3.50 km (resp. 0.04 km à 6.64 km).

N=26 individus se sont déplacés (distance moyenne entre deux contacts > 200 m et nombre de contacts \geq 2). Parmi ces n=26 individus :

- n=16 individus ont réalisé de petits déplacements (distance moyenne entre deux déplacements > 200 m mais < 550m ; 3265.07 n'a pas une distance moyenne entre deux contacts > 200 m, mais elle s'est déplacée de 840 m au total et est donc considéré comme ayant bougé) ;
- n=10 individus ont réalisé des déplacements assez grands (distance moyenne > 550 m) et n=11 individus ont réalisé au moins un grand déplacement de plus de 1.2 km (n=2 avec une moyenne < 550 m et n=9 avec une moyenne > 550 m).

Pour les n=26 individus qui se sont déplacé, nous avons identifié cinq types de déplacement. Une descente (n=6), une montée (n=7), une descente puis une montée (n=7), une montée puis une descente (n=3) et une descente puis une montée puis une descente (n=3) depuis le premier contact.

Les graphes de ces n=26 individus sont donnés en annexe, groupés par type de déplacement.

En données brutes, en moyenne ou uniquement sur les valeurs maximum, il n'y a pas de relation entre le temps qui sépare deux contacts et la distance parcourue entre ces deux contacts.

Globalement, au cours de la première année, la plupart des contacts ont été enregistrés non loin du site de remise à l'eau après marquage (Figure 39). Par la suite, la répartition spatiale des contacts s'est un peu étendue, même si elle est toujours restée centrée sur le site de remise à l'eau des anguilles.

3006.02

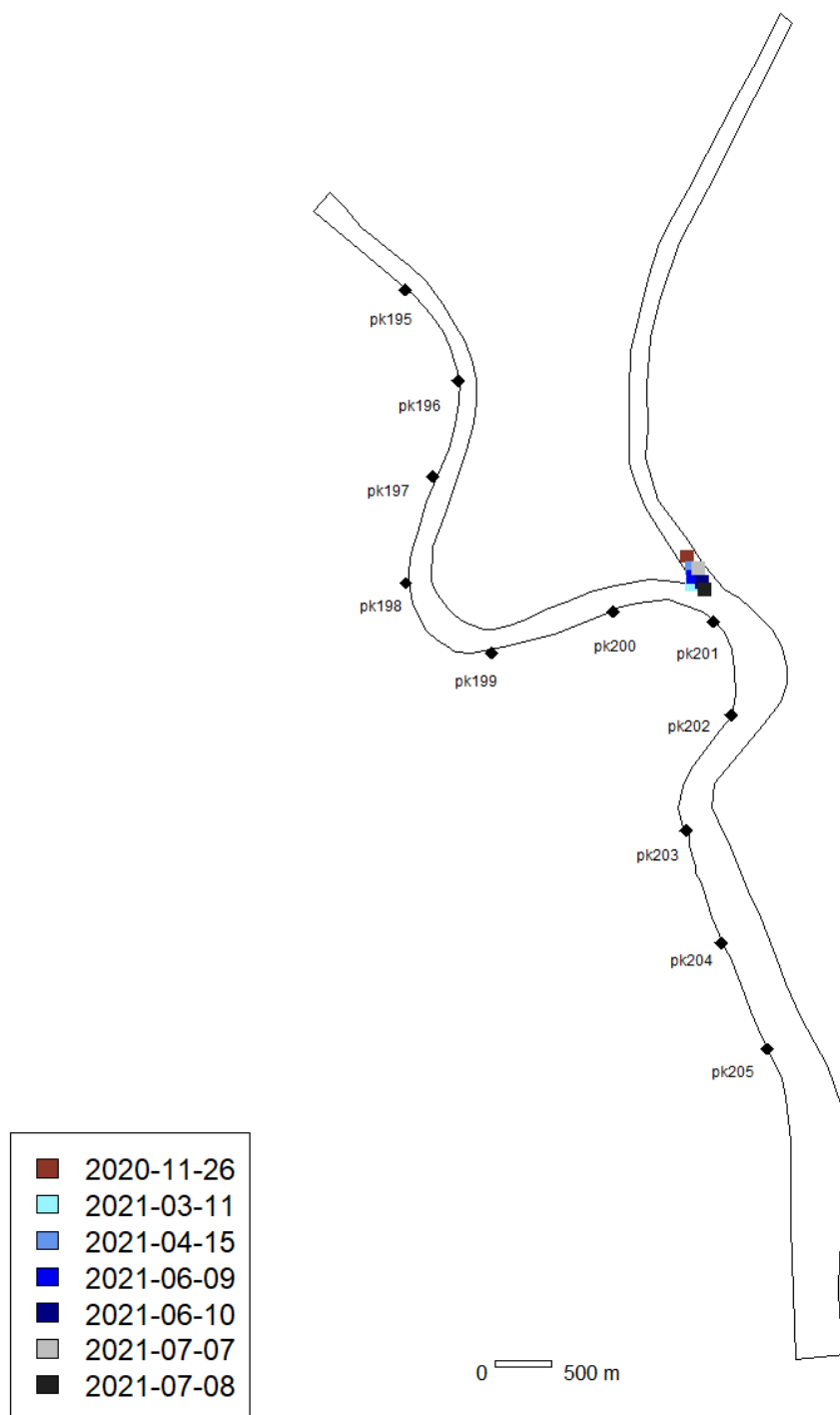


Figure 42: Cartographie simplifiée de l'emprise prospectée en mobile autour de la zone de marquage (pointe de la presqu'île de la restitution, entre les Pks 200 et 201). Sur cette cartographie sont présentés les contacts de l'individu 3006_02 au cours des n=7 prospections pour lesquelles cette anguille a été contactée. Cet individu est considéré comme « immobile ». Les Pks sont les point kilométriques le long du Rhône (RCC et chenaux). L'ensemble des cartographies pour tous les individus contactés sont disponibles en Annexe.

3565.15

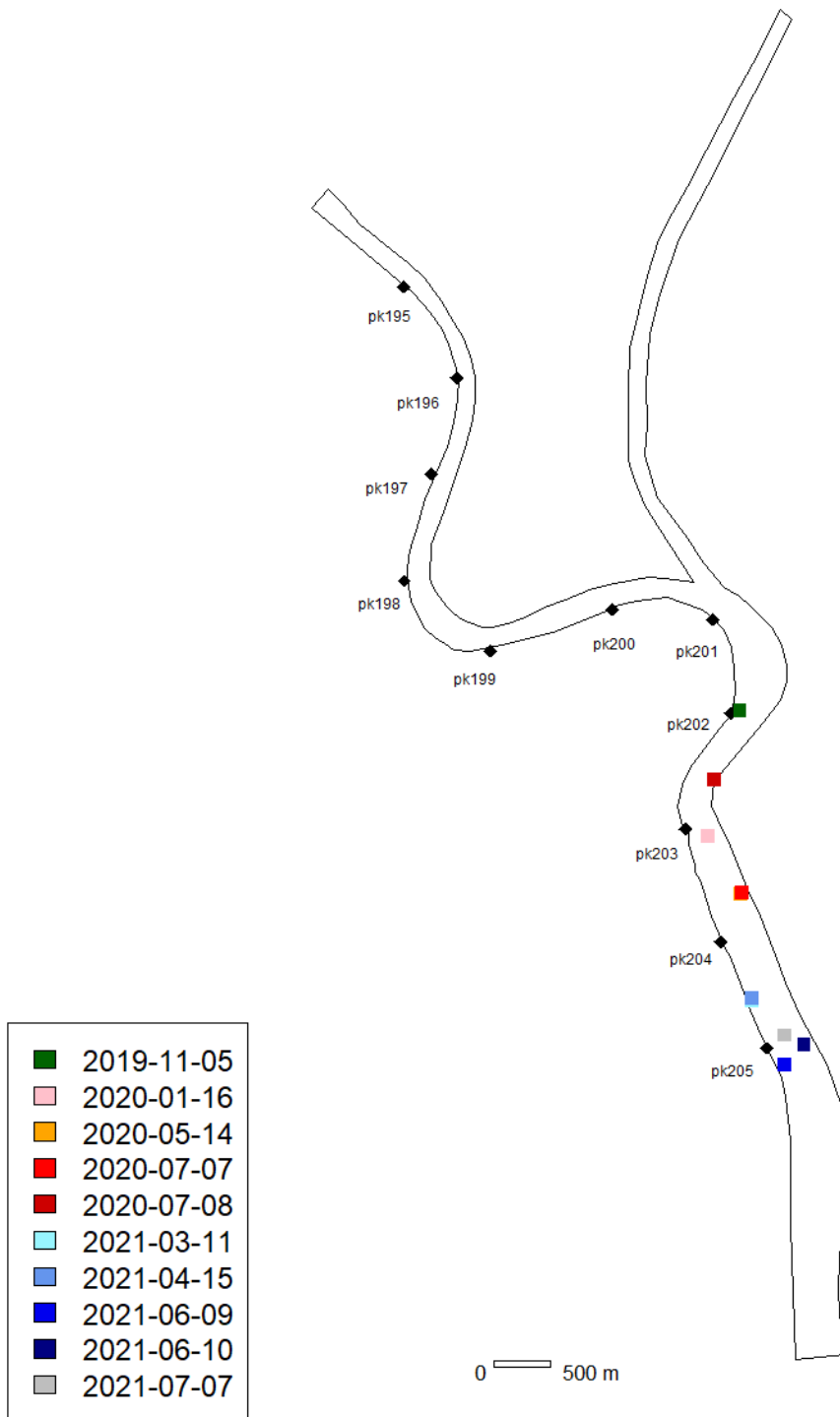
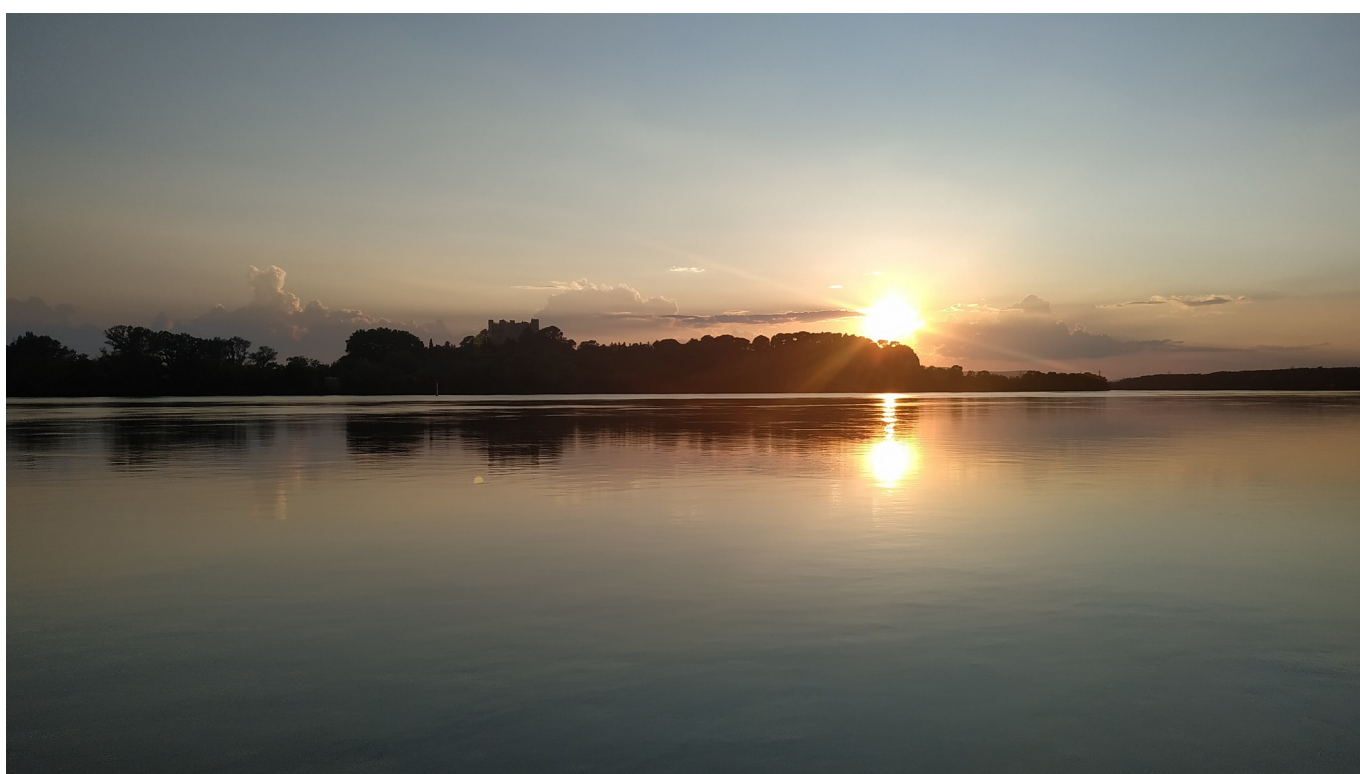


Figure 43: Cartographie simplifiée de l'emprise prospectée en mobile autour de la zone de marquage (pointe de la presqu'île de la restitution, entre les Pks 200 et 201). Sur cette cartographie sont présentés les contacts de l'individu 3565_15 au cours des n=10 prospections pour lesquelles cette anguille a été contactée. Cet individu est considéré comme « mobile ». Les Pk sont les point kilométriques le long du Rhône (RCC et chenaux). L'ensemble des cartographies pour tous les individus contactés sont disponibles en Annexe.



(vue depuis l'aval du pont routier de Roquemaure – 20200610 – H. Capra – INRAE)



(vue du secteur du Pk220 – Chateau de Montfaucon en rive droite – 20210610 – H. Capra – INRAE)

DISCUSSION

Synthèse rapide

Lors des trois premières années de l'étude DAARAC, n=234 anguilles, principalement déterminées au stade FIII de plus de 600 g, ont été équipées de marques émettant un signal acoustique toutes les 3 sec pendant 2,5 ans. Les anguilles marquées étaient toutes remises à l'eau 12 km en amont de l'aménagement de Caderousse.

Parmi les n=234 anguilles marquées, 28% n'ont jamais été contactées, 38% ont été contactées à l'amont (prospections mobiles) sans jamais dévaler et 34% sont considérées comme ayant dévalé (31% avec une voie de passage connue ; Figure 44).

Les dévalaisons sont intervenues principalement en octobre et novembre suivant le marquage (fin août pour les trois années de marquage et novembre pour les deux premières années), de nuit pour la grande majorité, lors d'une conjonction de baisse du nyctémère, de baisse de la température de l'eau et surtout d'une forte augmentation du débit. Relativement peu d'anguilles (6.8 % des anguilles marquées) dévalent dans les 72 h post-marquage, même si cette proportion est forte pour les anguilles transloquées depuis le « Sud » en novembre 2019. Notre volonté de capturer et marquer des anguilles argentées directement en amont de l'aménagement de Caderousse s'est avérée un choix capital, même si ce choix a imposé un effort d'échantillonnage extrêmement lourd. De plus la majorité des individus capturés et marqués étaient au stade d'argenture FIII, ce qui n'a pas augmenté nos chances de détecter des anguilles en dévalaison. En effet proportionnellement au nombre d'individus marqués les stades FIV et FV dévalent plus que les stades FIII. Très peu d'anguilles ont dévalé l'année d'après leur marquage. Cela peut signifier que le marquage pourrait avoir un effet négatif sur le déclenchement de la dévalaison ou sur la poursuite de la métamorphose vers une argenture complète, voire sur la survie des individus.

Les anguilles empruntent majoritairement (82 % des anguilles qui ont dévalé) la route de l'Usine, avec le risque de blessure lié au passage dans les turbines (environ 7 % de mortalité estimée par Heisey *et al.* 2019 à partir des données de CNR-Normandeu. 2011). Cependant, même après avoir emprunté la voie du RCC, jugée moins traumatique, des anguilles stoppent leur dévalaison. Au total ce sont 15 % des anguilles ayant franchi l'aménagement qui n'arrivent jamais à l'aval de la restitution, soit 2 km plus à l'aval. Aucune anguille n'a franchi l'aménagement par l'écluse et aucune anguille arrivée en Arles n'a emprunté le Petit Rhône.

Le comportement d'une anguille qui dévale semble être de ne plus s'arrêter (en utilisant le courant et/ou en nageant). Mais seulement n=18 anguilles ont été détectées en Arles, soit 29 % des anguilles ayant été détectées à l'aval de la restitution (ou 23 % des anguilles ayant dévalé). Il existe certainement un effet du cumul des aménagements, avec un arrêt possible ou une mortalité à chaque aménagement.

Au total, n=102 individus (soit 44% des individus marqués) ont été contactés au moins une fois lors d'un suivi de télémétrie active (mobile) et n=12 d'entre eux ont dévalé par la suite. Le nombre important d'anguilles marquées restées en amont ou qui n'ont jamais été détectées est difficilement explicable de

manière certaine, même si la capture à l'électricité et le marquage sont deux stress capables de modifier le comportement des poissons. Cela renforce la décision prise de marquer beaucoup d'anguilles (l'objectif initial était n=300 anguilles).

Une synthèse possible des résultats de l'étude DAARAC est présentée sur la Figure 44.

Discussion à propos de notre expérimentation

Un vrai challenge

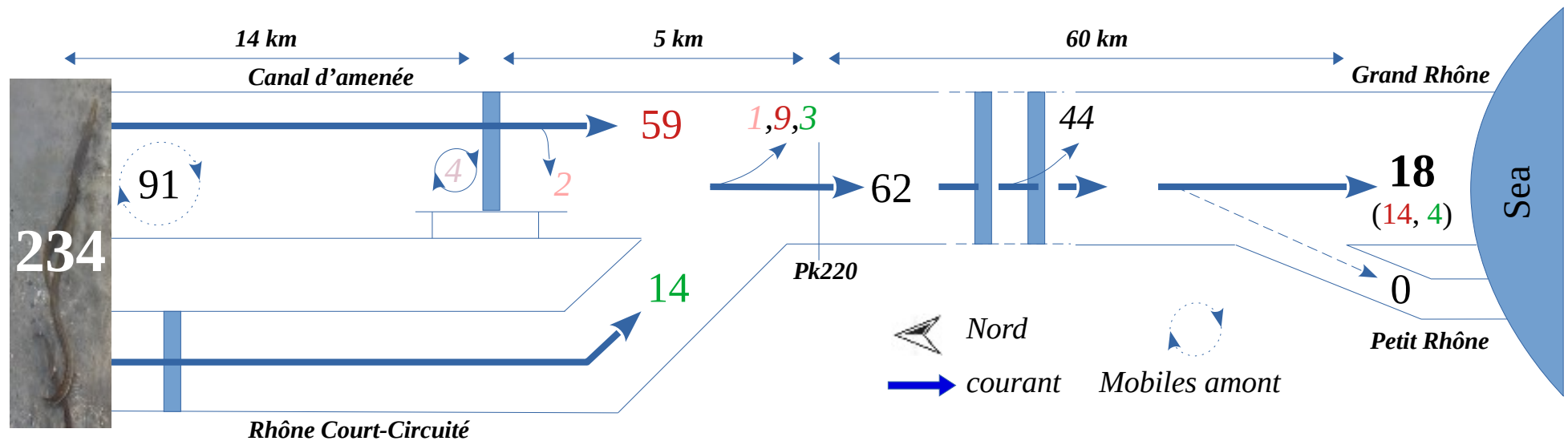
Une expérimentation sur plusieurs années sur le bas Rhône nécessitant un suivi en continu du milieu (aux portes de détection) est un énorme challenge. Globalement toutes les équipes ayant participé à ce projet ont permis d'en faire un succès, malgré les nombreuses difficultés rencontrées telles que :

- x bruits dans l'eau (Arles ? PK218 ?) ==> post traitement difficile voire impossible
- x coupures électriques, surtensions (orages) malheureusement concomitant avec les dévalaisons de début décembre 2018
- x coupure du câble dans l'eau à Arles RG
- x coupure du câble (dégradation) sur Aval Usine RG
- x 3G chaotique pour la télétransmission journalière des données
- x dysfonctionnements (fragilité) des enregistreurs => plusieurs renvois de un à quatre enregistreurs à Seattle (USA) pour réparation.

Notre étude a été réalisée dans un grand fleuve, ce qui est assez rare et compliqué à gérer.

Pas mal d'études avec des objectifs proches de ceux poursuivis ici (Calles et al., 2010 ; Aarestrup et al., 2010 ; Acou et al., 2008) ont été effectuées dans des cours d'eau de gabarit bien moindre que le Rhône à Caderousse ou de gabarit plus comparable à celui Rhône, tel que le Rhin par exemple (Bretler et al., 2007 ; Trancart et al., 2018), mais avec des moyens très importants, ou encore sur la Seine (Béguin et al., 2021) ou la Meuse (Lerquet et al., 2020).

En effectifs bruts (n=234 marquées)



Sur l'ensemble des n=234 anguilles marquées :

- n=64 n'ont jamais été entendues
- n=91 ont été contactées à l'amont sans jamais dévaler
- n=79 sont considérées comme ayant dévalé (n=73 [59+14] avec une voie de passage connue)
- N=18 [14+4] sont arrivées en Arles – Grd Rhône

Figure 44 : Représentation synthétique des résultats du projet DAARAC. Les nombres sont des effectifs d'anguilles en phase d'argenteur marquées et suivies au cours des quatre années du projet (2018 – 2022).

Capture et marquage

La capture des individus dans le Rhône en amont de l'aménagement de Caderousse était un prérequis pour le projet Daarac, pour éviter tous les biais possibles liés à la translocation, notamment une mauvaise adaptation aux déterminismes environnementaux du Rhône sur le site d'étude. Cette solution a coûté beaucoup d'énergie aux équipes impliquées dans la capture des individus. Il se trouve que les anguilles argentées de plus de 600 g ne sont pas nombreuses et très réparties le long des berges. Leur habitat de prédilection (enrochements profonds, sans trop de sédiments fins et avec un léger courant) n'est pas non plus très abondant. Donc la recherche d'individus compatibles avec nos règles de marquage a été très longue. Une solution de translocation depuis le sud du bassin eut été certainement bien moins chronophage. Cette solution a été testée en novembre 2018. Ceci nous a permis de constater que les individus transloqués (n=20 marqués) avaient proportionnellement plus souvent un comportement de dévalaison post marquage (inférieurs à 48h) que les individus capturés sur site. En revanche pour la réponse à la question principale posée par la CNR, à propos de la route de dévalaison privilégiée, il n'y a pas eu de différence notable entre les individus transloqués (n=8/20) et les individus capturés sur site (n=65/214) puisque 75 % d'entre eux choisissent aussi la route de l'usine-turbines (contre 80 % au total, dont 90 % pour les individus de l'amont, 78 % pour ceux de la zone de marquage ; Tableau 5). En revanche, aucun de ces individus n'a atteint Arles.

La méthode de capture des individus pourrait influencer fortement le comportement des individus marqués. Sur la rivière Susquehanna aux Etats Unis, des anguilles issues de deux méthodes de capture différentes (pêche électrique et piégeage passif avec des engins de pêche professionnelle) ont montré que les anguilles électrisées et marquées avec des transpondeurs hydroacoustiques n'ont pas migré contrairement aux autres (Normandeau Associates Inc & Gomez and Sullivan Engineers, 2011). La pêche électrique, majoritairement utilisée dans notre étude, n'est pas souvent utilisée dans les études de dévalaison des anguilles argentées, au profit d'une pêche au verveux ou équivalent (Bretler et al., 2007 ; Bultel et al., 2013 ; Trancart et al., 2018) et pourrait provoquer un stress physiologique, non visible, plus important que lors d'une capture au verveux. Notre secteur d'étude a été échantillonné aux verveux (pêcheur professionnel J.L. Fontaine), mais cette technique ne s'est pas toujours révélée la plus efficace dans les conditions de notre expérimentation. L'idéal aurait été de pêcher les anguilles en dévalaison sur des périodes plus longues, ce qui imposait une stabulation assez longue aussi (plusieurs semaines), ce que nous ne souhaitons pas. En utilisant principalement la pêche électrique comme technique de capture des anguilles dans leur milieu, nous avons observé que 66 % des individus marqués n'ont jamais dévalé ou n'ont jamais été contactés. Nous avons tout de même marqué n=16/234 anguilles capturées avec des verveux positionnés en amont de l'aménagement de Caderousse et n=20/234 capturées dans des étangs du sud du bassin avec des verveux. Sur ces 36 individus capturés sans électricité, n = 14 ont dévalé (6/16 pour les verveux amont et 8/20 pour les verveux aval) et donc 61 % des individus issus de verveux n'ont pas dévalé. La pêche électrique telle que pratiquée pendant ce projet ne peut donc pas expliquer entièrement le nombre important d'individus n'ayant pas dévalé. Les 66 % d'individus dont on ne connaît pas le sort dans le Rhône est assez proche des 70 % observé par Acou (2006) parmi les anguilles marquées en amont de la retenue du barrage de Bois Joli sur le Frémur. Au contraire, Verhelst et al. (2018-j.fish) ont marqué n=50 anguilles, capturées par verveux, et toutes ont migré vers l'aval. N=39 ont migré dès l'année du marquage d'autres ont migré l'année suivante et même jusqu'à trois ans post-marquage (n=1).

Suite au marquage près d'un tiers (29%) des individus restent en amont de l'aménagement sans jamais dévaler (en tout cas pendant la durée de vie de l'émetteur, soit environ 2 ans). Ces individus ont été contactés avec les suivis mobiles. Malheureusement, à l'exception de ceux qui se sont déplacés significativement (> 500 m), il est impossible d'affirmer qu'il sont encore vivants. En effet, la marque continue d'émettre même dans un poisson mort et même dans l'eau (cf. l'utilisation des marques comme marques test (beacon tags) de fonctionnement des hydrophones). Ce pourcentage d'individus qui ne se

déplacent plus n'est pas surprenant en télémétrie, dépendant aussi du mode de capture (Normandeau Associates Inc & Gomez and Sullivan Engineers, 2011). Ce résultat justifie le marquage d'un nombre important d'individus pour avoir un nombre suffisant d'individus ayant un comportement de dévalaison. Le marquage, étape incontournable des études de télémétrie acoustique, n'est certainement pas anodin pour les anguilles et leur comportement s'en trouve certainement influencé. Les effets post marquage biaisent directement et sans doute fortement le nombre d'individus qui dévalent, sans que cela puisse être évalué quantitativement. L'intérêt de marquer beaucoup d'individus (ici n=234) permet d'avoir suffisamment d'individus dont le comportement peut raisonnablement être considéré comme représentatif. Soulignons aussi que le pourcentage d'individus qui décident de dévaler par rapport au nombre d'individus marqués, ne représente pas un pourcentage de dévalant dans la population en amont de l'aménagement.

La majorité des études de la dévalaison des anguilles argentées relâchent les individus marqués directement dans le milieu et quelques heures après la chirurgie. Les poissons sont relâchés autour de leur lieu de capture (e.g. Trancart et al. 2019, ; Verhelst et al., 2018 - 1016) ou déplacés de plusieurs dizaines de kilomètres (e.g. Calles et al., 2021 ; Trancart et al., 2018 ; Bultel et al., 2013 ; Aarestrup et al., 2010). Dans notre étude, la plupart des individus marqués ont été capturés dans le secteur du marquage (RCC et canal de fuite de Donzère-Mondragon ; n=130). D'autres ont été capturés en amont de cet aménagement (n= 84) et déplacées vers l'aval pour le marquage et la remise à l'eau et d'autres enfin, n=20, ont été transloquées depuis l'aval du bassin. Du point de vue origine des individus marqués, notre étude s'assure au moins de la spécificité des anguilles du Rhône en amont de Caderousse (pour la grande majorité).

Nous avons eu la chance de recapter n=2 individus marqués un an auparavant (identifiées de manière certaine par le pit-tag). Les deux individus avaient perdu une part importante de leur masse (30 et 50%). L'un d'eux avait même « perdu » sa marque acoustique, même si pour les deux individus les cicatrices liées à l'acte chirurgical étaient parfaites. L'état de santé de ces deux anguilles nous laisse penser que : 1) la marque peut être expulsée (rapidement?) après la chirurgie, malgré un intervalle entre point de suture relativement serré et inférieur au diamètre de la marque (15 mm) ; 2) le diamètre de la marque est important relativement au diamètre du corps de l'anguille (40 à 60 mm) et peut tout à fait obstruer le système digestif. Le problème soulevé par ce second point est soit que l'anguille argentée en dévalaison, qui est réputée ne plus se nourrir, doit visiblement s'alimenter si la dévalaison n'est pas déclenchée (possible au stade FIII ; Durif et al., 2005), et la marque peut l'en empêcher, soit que le marquage stoppe le processus de métamorphose-dévalaison et l'anguille qui ne se nourrit effectivement plus maigrit. Compte tenu du très faible nombre d'individus (n=9) ayant dévalé plus d'une année après le marquage, il peut être opportun dans ce genre d'étude d'utiliser des marques plus petites (à durée de vie inférieure à l'année) limitant ainsi les biais sur le comportement (moins d'inconvénients pour le poisson) et simplifiant aussi le marquage en lui-même (moins de points de suture). Pour cette expérimentation nous ne savons pas si une anguille marquée (au stade FIII ou FIV) dévalerait dans l'année ou pas. Nous savons maintenant que, dans le Rhône et parmi les anguilles marquées pour ce projet, la majorité des individus dévalent dans l'année qui suit le marquage.

La phase de capture-marquage semble pour certains individus déclencher une dévalaison. Il n'est pas possible de savoir si c'est une réaction au marquage ou si l'individu entame vraiment sa dévalaison vers la mer. Cependant, parmi les n=18 individus détectés en Arles le délai minimum entre le marquage et la première détection était de 15 j. Donc les individus marqués ayant dévalés très vite (dans les trois jours par exemple) après le marquage ont stoppé leur dévalaison (puisque jamais arrivés en Arles). Parmi les n=16 individus ayant dévalé dans les 72h post-marquage, n=10 individus ont dévalés du point de remise à l'eau au Pk220 (n=9 via l'usine et n=1 via le RCC) et n'ont jamais été recontactés ensuite. Dans ce cas, le déterminisme de la dévalaison est très probablement le marquage, mais cela a-t-il influencé le choix de la route de dévalaison ? Sans pouvoir répondre à cette question, il est intéressant de noter que les individus qui auraient eu une dévalaison « forcée » par le marquage utilisent principalement la route de l'usine 90%). Trancart et al. (2018) montrent dans leur étude sur le Rhin (n=1099 anguilles argentées marquées, à

68 % au stade FV, de quatre provenances différentes) que le facteur principal expliquant la dévalaison des anguilles sur les premiers kilomètres est le nombre de jours après le marquage : 38 % à 90 % des anguilles marquées dévalent dans la semaine suivant le marquage. [Remarque : il est intéressant de noter que le taux le plus faible de dévalaison post marquage est obtenu pour les individus capturés par pêche électrique]. Winter et al. (2005) ont étudié expérimentalement différents effets du marquage (Pit-Tags et gros émetteur Nedap) sur la survie et le comportement de n=40 anguilles argentées. Après 11 semaines d'expérience le taux de mortalité est similaire entre les groupes Pit-Tags (15%) et Pit-Tags+Nedap (10%) ainsi que la chronologie des réponses comportementales aux stimuli extérieurs (e.g. luminosité). Seule l'activité individuelle est 37 % moindre pour le groupe équipée (par chirurgie) d'un gros émetteur cylindrique en plus du Pit-Tag. Ce constat de moindre activité pourrait expliquer en partie l'immobilité de bon nombre d'individus marqués dans notre projet, d'autant plus si ces individus ont été capturés à l'électricité. Mais plus globalement, l'effet du marquage sur le comportement des individus à moyen et à long terme reste encore très mal connu (Matley et al., 2024), sachant que toutes les étapes de la capture à la remise à l'eau ont une grande importance sur les résultats et leur transférabilité (Clemens et al., 2023).

Enfin, 27 % des individus n'ont jamais été contactés. Même si ce pourcentage est important il est également fréquemment observé dans les expérimentations de télémétrie acoustique (e.g. Brown et al., 2006 - 38 % des anguilles jamais détectées après remise à l'eau). Sur n=939 anguilles argentées relâchées en amont d'aménagements hydroélectriques sur le Rhin, Trancart et al. (2018) observent que 31.5 % n'ont jamais été contactées. Une expérimentation sur le Rhône à Bugey en 2010 (Capra et al., 2017) a montré que même avec un suivi mobile hebdomadaire dans un bief de 35 km, presque un quart des individus n'étaient pas contacté à chaque suivi mobile (espèces différentes de l'anguille). Mais lors des tests menés avant cette expérimentation de 2010 nous avons montré qu'une marque placée dans un enrochement était non détectable en tracking mobile depuis le chenal, même à très faible vitesse de navigation (Pella et al., 2011). Or, les anguilles, notamment celles en phase d'argenture vivent plus ou moins profondément au sein des enrochements. Il est aussi reconnu que certaines anguilles peuvent rester très longtemps dans la même cache. Donc les individus que nous n'avons jamais contactés ont pu se cacher et ne plus bouger (y compris en mourant) ou la marque s'est arrêtée. Notre expérience depuis 2009 montre cependant que les marques de type « HTI » utilisées respectent globalement la durée de vie constructeur, même si quelques unes ont eu des durées de vie plus courtes.

Verhelst et al. (2018-eff) ont montré, dans le système de polder Belge, que les anguilles jaunes (FII et FIII principalement ; n= 39/52 marquées) se déplaçaient peu autour de la zone de capture - marquage – relâche (home range moyen de 3.9 km). Mais n=7/52 (13%) n'ont pratiquement pas bougé (détection par un seul hydrophone du réseau). En comparaison, parmi les n=102 individus contactés au moins une fois en amont de Caderousse, n=34 (dont n=12 ont dévalé ensuite) n'ont été contactés qu'une seule fois et n= 42 se sont très peu déplacé (< 200 m). Donc dans notre étude ce sont quand même 27 % des individus marqués qui ont soit été contactés une seule fois soit été très peu mobiles. Ce pourcentage est nettement supérieur à celui de Verhelst et al. (2018-eff). L'habitat disponible dans le Rhône, globalement bien moins favorable que celui de polders Belges (moins profond, plus courant, moins d'abris), pourrait expliquer cette différence.

La dévalaison

Le taux de dévalaison total observé dans notre étude est de 34 % des anguilles argentées marquées (n=79/234). Au regard des résultats de quelques études en Europe ce taux est :

- correct en comparaison avec : Acou (2005 ; 30 % des anguilles marquées dans le Frémur en amont de la retenue de Bois Joli ont été correctement suivies) ; Aarestrup et al. (2010 ; montre une belle survie en eau douce, mais seulement 40 % des anguilles marqués sortent de l'estuaire-fjord) ; Bau et al. 2011 (sur quatre campagnes (n marquées de 30 à 75 anguilles transloquées par campagne), le taux d'anguilles

marquées qui ne franchissent même pas le premier aménagement varie selon les campagnes de 7 % à 40 %)

- moindre en comparaison avec : Bultel et al. (2013 ; 93 % des individus marqués sortent de l'estuaire de la Loire, sans barrage) ; Calles et al. (2010 ; seulement 8 % des anguilles relâchées ne bougent plus) ;

Dans des études très similaires à Daarac, Profish a montré :

- sur la Seine (Barrage de Poses) que sur n=109 anguilles argentées marquées (capturées au verveux), n=33 (30%) ne dévalaient pas. En revanche parmi les anguilles dévalantes (89 % de nuit), 91 % arrivent à l'estuaire, un pourcentage très proche des 93 % de Bultel et al. (2013), sur un linéaire sans obstacle à la dévalaison (Beguin et al., 2021).

- sur la Meuse (Lerquet et al., 2020) que sur n =140 anguilles argentées (FIV et FV) 14 % n'ont jamais été détectées et que 70 % des dévalaisons s'observaient de nuit. Cette expérimentation est très intéressante car elle suit des anguilles sur n=6 aménagements consécutifs. En amont de chacun d'eux 14 % à 20 % des individus ne dévalent pas à travers l'aménagement. Les anguilles dévalent très majoritairement par le barrage et évitent donc les turbines des centrales. Ces aménagements sont différents de ceux du Rhône puisque la centrale et le barrage ne font qu'un obstacle. Donc les flux sont certainement dirigés principalement vers le barrage. Enfin, sur n=98 individus présents en amont du premier aménagement, 85 % l'ont franchi et 46 % ont franchi les 6 aménagements

Beaucoup de facteurs influencent le choix comportemental de dévaler (Bruijs & Durif, 2005) : l'âge, l'environnement (débit, température, luminosité), la distance à la mer, le stade d'argenture et lors d'études de télémétrie il est possible d'ajouter la capture et le marquage. Acou et al. (2008) montrent qu'il y a toujours un premier pic de dévalaison assez fort, voir très fort, éventuellement c'est le deuxième pic qui est le plus fort, mais ensuite les dévalaisons ne sont plus aussi importantes. Teichert et al. (2020) montrent aussi, en développant leur modèle, que la migration des anguilles est clairement liée aux impulsions de débit et d'autant plus si ce sont les premières augmentations de débit de l'automne. Même si dans notre étude les dévalaisons s'observent à différents moments de l'année, le facteur principal semble bien être la/les première/s augmentation/s du débit très forte/s en amont de Caderousse (au delà de 1 000 ou 2 000 m³ s⁻¹) qui marque/nt la fin de l'étiage estival. La concordance des dévalaisons avec les prévisions du modèle de Teichert et al. (2020) confirme le rôle majeur du débit. La température peut aussi jouer un rôle (elle doit être en baisse), mais pas trop basse (i.e. < 10 – 11°C) sinon la dévalaison peut s'arrêter (Acou et al., 2008 ; Boubée et al., 2001). Enfin, les stades d'argenture qui semblent indiquer une dévalaison possible sont les stades FIV et FV. Le stade FIII largement majoritaire dans nos anguilles argentées marquées est un stade défini comme pré-migrant par Durif et al. (2005) qui peut évoluer en stade FIV et FV à la fin de l'été. Durif et al. (2005) estiment que les anguilles peuvent stopper leur métamorphose d'argenture pour attendre la meilleure « fenêtre de dévalaison » possible. Ainsi nos anguilles au stade FIII ont pu stopper l'évolution de leur argenture, en lien avec les débits faibles et les températures assez élevées observés après les marquages estivaux (surtout 2018 et 2019) et / ou suite à leur capture – marquage. Enfin, l'activité des anguilles est censée augmenter pendant les nuits sombres et sans lune (Sandlund et al., 2017), mais dans Teichert et al. (2020), c'est la variable ayant le moins de poids dans le modèle développé. Toutefois, la probabilité de migration était plus faible pendant la phase de pleine lune et maximale pendant les phases de nouvelle lune et de lune décroissante (Teichert et al., 2020).

La période de dévalaison principale observée dans notre étude est octobre – novembre et pour la majorité des enregistrements, de nuit. Ces observations sont en accord avec toutes les expérimentations lues pendant cette étude (par exemple la synthèse sur la Loire de Durif & Elie, 2008 ; Aarestrup et al., 2010 [sept-oct]; Calles et al., 2013 [sept-nov]). Les proportions d'individus qui dévalent de nuit peuvent varier mais sont rarement inférieure à 70 %. Les dévalaisons peuvent aussi s'observer jusqu'en février dans certains sites d'étude (Bruijs & Durif, 2009). Verhelst et al. (2018-j.fish) ont observé la grande majorité des dévalaisons en octobre (n=34/48) et très majoritairement de nuit. Lerquet et al. (2020) observe 70 % de déplacement nocturne, un des taux les plus faibles rencontrés.

La vitesse de déplacement lors de la migration vers l'aval des anguilles argentées n'est pas toujours renseignée. Il semblerait cependant que les anguilles nagent principalement dans le courant, sans être en nage forcée, excepté dans les retenues (e.g. Trancart et al., 2020), expliquant en partie les durées importantes de dévalaison dans ces systèmes. Bau et al. (2008) montrent effectivement que les anguilles en dévalaison utilisent principalement le courant et se déplacent jusqu'à 100 fois plus vite à fort débit (débit fort = $> 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour un module de module = $82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) avec des vitesses moyennes de 4 km/h (1.1 m s^{-1}). Bretler et al. (2007) observent une variabilité importante inter-individuelle de 0.2 m s^{-1} pour 90 % des individus à 2.2 m s^{-1} pour certaines. Les travaux de ProFish montrent des vitesses moyennes de déplacement de 1.05 m s^{-1} sur la Seine (Beguin et al., 2021), et de 0.3 m s^{-1} à 1.2 m s^{-1} sur la Meuse en fonction des aménagements étudiés (Lerquet et al., 2020). Enfin, Bultel et al. (2013) enregistrent une vitesse moyenne de 0.05 m s^{-1} à 0.6 m s^{-1} . Ces faibles valeurs s'expliquent peut être par le fait que dans l'estuaire les courants ne sont pas toujours favorables. Aarestrup et al. (2010) observent aussi des vitesses maximum basses, 0.77 m s^{-1} , en étudiant les dévalaisons dans une rivière se jetant en mer via un fjord. Les anguilles sont capables de suivre des courants très rapides mais ne compensent pas par la nage (très) active les courants faibles. Ainsi le passage dans des retenues ralentit leur progression et en nageant, les anguilles brûlent plus les réserves prévues normalement pour atteindre le site de reproduction.

Passage Usine-turbines vs Barrage-Rcc

En réponse à la question principale de la CNR à propos des voies de passage des anguilles argentées en dévalaison à travers un aménagement tel que celui de Caderousse, d'après nos résultats, la réponse est sans équivoque : à 80 % par l'usine, avec un taux de survie estimé à $93 \% \pm 2.5 \%$ et un taux de blessures visible de 7.2 % selon l'étude CNR-Normandeu de 2010 (Heisey et al., 2019). Une des raisons facile à invoquer pour ce « choix comportemental majoritaire » (que les anguilles dévalent post-marquage, normalement ou après une translocation, cette proportion reste valable) est la prédominance des flux en direction du canal d'aménagé et de l'usine. Pourtant pendant les phases de fort débit ($> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et compte tenu de la morphologie du Rhône à hauteur de la diffluence Barrage_RCC versus Canal d'aménagé_Usine il serait raisonnable de penser que des veines de courant assez soutenues s'orientent vers le barrage. Pourquoi dans ce cas les anguilles maintiendraient leur direction vers l'usine ? Une analyse de la courantologie supérieure à $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nous aiderait sans doute à répondre à cette interrogation.

Trancart et al. (2018) ont montré que parmi les anguilles marquées et relâchées dans le Rhin en amont de Kembs, ayant entamé une dévalaison, 93 % sont passées par le canal usinier et 7 % par le vieux Rhin. Dans cette étude le passage des anguilles par le vieux Rhin s'expliquerait par l'augmentation du débit dans le vieux Rhin suite au dépassement du débit d'équipement des usines du canal usinier ($1\,400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Mais au final le taux d'échappement du secteur étudié (équivalent à notre Pk220) était, de manière inattendue, bien moindre par le vieux Rhin (31%) que par le canal usinier (50 %) avec 4 usines dont les taux de mortalité estimés des turbines varient de 7 % à 20 % (50 % au total). Bau et al. (2013) dans une étude de la dévalaison des anguilles argentées sur le Gave de Pau, ont montré exactement l'opposé de Daarac à savoir que 80 % des anguilles marquées franchissaient les aménagements via le barrage et 20 % par l'usine-turbines, en forte hydrologie (dès que le ratio de débit aval barrage / débit usine variait de 2 à 5 ; $150\text{-}200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour un module de $82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)

Une analyse des dates de passage via le Barrage-Rcc de Caderousse en fonction du débit horaire transitant dans le Rcc montre que la très grosse majorité des passages Rcc sont observés pour un débit $> 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($n=3/4$; $n=5/7$ et $n=3/3$ pour les trois années avec passages). Cependant, si nous regardons l'ensemble des passages d'anguilles (Usine et Rcc), il y a eu beaucoup de jours ($n=7, 9$ et 6 respectivement pour les trois années avec enregistrement de passages) avec un débit fort dans Rcc et sans passage d'anguille via Barrage - Rcc mais avec passage Usine. Pour l'ensemble de ces passages via l'usine, le ratio Débit-Rcc/Débit-Usine n'a dépassé le seuil de 2 que deux fois (3 % des passages), ce qui rend

certainement le barrage peu attractif. Pour les passages Rcc, ce ratio est majoritairement faible (majoritairement < 1) mais $n=4$ passages (29 % des passages) ont tout de même eu lieu avec un ratio > 2 .

La migration vers l'aval des anguilles argentées peut ne pas être seulement une dérive passive avec le courant mais le choix de la route de dévalaison peut dépendre fortement du comportement des poissons et de la géométrie des sites (par exemple, l'orientation des prises d'eau, l'orientation des barrages, l'orientation du cours d'eau principal avant l'obstruction ; Bau et al., 2013 ; Trancart et al., 2018).

La configuration de la diffluence en amont de l'aménagement de Caderousse (Pk212.0 – 212.5) ne semble pas propice aux franchissements via le barrage et le Rcc (à confirmer après étude de la morphologie – courantologie de la diffluence). Et pour notre étude, dans les conditions de débit rencontrées pendant notre expérimentation, le chenal qui mène à l'usine était plus attractif que les écoulements vers le barrage. Cette observation est à mettre en parallèle avec les observations issues des enregistrements en Arles, installés pour évaluer les échappements d'anguilles argentées via le Petit Rhône et via le Grand Rhône. Parmi les anguilles marquées qui ont dévalé jusqu'en Arles, aucune n'a emprunté le Petit Rhône. L'observation de la courantologie et de la morphologie du Rhône au niveau de la diffluence Grand Rhône – Petit Rhône ne laisse aucun doute sur la très faible attractivité du Petit Rhône, confirmant ainsi que les anguilles argentées dévalent bien avec les veines de courant principales.

Il reste une possibilité de franchissement, qu'il n'était pas possible de surveiller pendant cette étude, car techniquement impossible : le franchissement de l'usine par le déversoir (coté rive droite de l'usine). Ce déversoir est principalement utilisé pour aider à l'élimination des bois morts flottant ou pour aider à la gestion de la cote du plan d'eau amont lors de l'augmentation du débit entrant, qui justement est un des déterminismes principaux de la dévalaison des anguilles. Mais notre analyse des ouvertures du déversoir par rapport aux passages des anguilles par l'usine laisse penser qu'elles n'utilisent pas ou très peu cette voie de passage lorsqu'elle est disponible. D'abord parce que pour deux des trois années (an1 et an3) de suivi lors des passages de la grande majorité des anguilles (91%) le déversoir était fermé (la seconde année ne permet en revanche pas d'affirmer cela $n=7/25$). Ensuite parce que dans les quelques études qui ont analysé en 3D le comportement de nage des anguilles en dévalaison qui se présentent face à un ouvrage avec des turbines, les individus nagent plutôt au sein de la colonne d'eau, dans le tiers supérieur de nuit et plutôt dans le tiers inférieur de jour (Kjærås et al., 2022) ou au fond (Brown et al., 2006). Mais le fait que certains des individus montent et descendent dans la colonne d'eau (Brown et al., 2006) laisse tout de même la possibilité à ces individus de trouver le passage par le déversoir. On considérera alors les effectifs passant par les turbines comme un maximum d'individus (résultat conservatif), puisque le passage par le déversoir n'est pas impossible. Trancart et al. (2019) montraient qu'une hauteur d'eau d'au moins 40 cm était nécessaire en surverse pour permettre aux anguilles de passer un barrage. La profondeur sur le déversoir ouvert est nettement supérieure (3m).

Effets du cumul des obstacles à la migration

Les barrages avec retenue génèrent du retard dans la migration des anguilles argentées (Acou et al., 2008). Ce retard peut avoir des conséquences directes sur l'échappement (certaines anguilles stoppent leur migration), ou sur la reproduction (perte d'énergie trop importante avant même l'arrivée en mer ; Acou et al., 2008). Cet effet retard est également observé par exemple chez le saumon atlantique lors de la traversée des retenues d'aménagement hydroélectrique (Ben Jebria et al., 2021).

Il a déjà été montré que le nombre d'anguilles argentées en dévalaison décroît le long d'un cumul d'ouvrages non-hydroélectriques (Trancart et al., 2020 : 25 % des anguilles marquées en amont d'une succession de trois aménagements arrivent à l'estuaire). Le paradoxe issu de cette étude (renforcé par nos observations ou les résultats de Trancart et al. (2018) sur le Rhin – passage préférentiel par l'usine) est que l'avantage des aménagements hydroélectriques est que le courant permet aux anguilles de dévaler

rapidement, mais en passant par les turbines, augmentant significativement le taux de mortalité. Dans les deux cas, un nombre important d'anguilles stoppent leur migration vers l'aval au passage d'un barrage ou d'une usine hydroélectrique, ce qui diminue de manière très significative le taux d'échappement des anguilles des bassins très aménagés. Bau et al. (2013) dénombrent de nombreux arrêts de migration (69.3% des anguilles relâchées, 133/192) observés tout au long du secteur d'étude. Les observations ont permis d'identifier que 32% (43/133) des arrêts correspondaient à des anguilles mortes avérées et que pour les 68% (90/133) restants, il n'était pas possible de se prononcer sur l'état de l'individu et son devenir. Certains individus peuvent ne jamais franchir un aménagement alors qu'ils ont entamé une dévalaison (par exemple de 14 % à 20 % sur cinq des six aménagements étudiés par Lerquet et al. (2020)). Dans nos résultats nous n'avons détecté que n=4 anguilles qui se sont présentées à l'usine et qui ne l'ont pas franchi. En revanche 18 % des anguilles qui ont franchi l'aménagement de Caderousse (via l'usine ou le Rcc) et qui sont arrivées jusqu'au Pk218 n'arrivent jamais au Pk220. Calles et al. (2010) avaient montré que 17 % des individus ayant franchi un aménagement n'arrivaient pas au suivant, contre 4 % seulement des individus relâchés à l'aval de l'aménagement.

Perspectives de recherche

Calles et al. (2021) ont marqué 80 anguilles capturées en amont (entre 13 et 70 km) de l'aménagement ciblé pour une étude de dévalaison similaire à la notre, mais sur une rivière bien plus petite que le Rhône (rivière Ätran d'un bassin de 3342 km² avec un module de 57 m³ s⁻¹ [20–319 m³s⁻¹]). Ils ont libéré n=20/80 anguilles marquées à l'aval de l'aménagement. Cette idée est très intéressante et aurait pu être mise en œuvre lors de notre projet car elle permet d'évaluer l'influence de l'aménagement testé sur la dévalaison et l'échappement des anguilles. Cependant, à l'aval de Caderousse deux autres aménagements doivent être franchis pour arriver à la mer méditerranée. Il serait donc judicieux de marquer et lâcher six lots d'anguilles capturées « en dévalaison », pour s'assurer de leur propension à dévaler, et les relâcher en amont et en aval des trois aménagements les plus à l'aval du Rhône (Caderousse, Avignon et Beaucaire). Une première évaluation de l'influence du cumul des aménagements pourrait être abordée, comme cela a été réalisé par Calles et al. (2010) sur un seul aménagement. Ces auteurs ont montré que 96 % des individus relâchés à l'aval d'un aménagement ralliaient l'aménagement suivant, 24 km plus en aval, contre 83 % des individus ayant franchi le barrage et le TCC et moins de 30 % des individus ayant franchi l'usine. A noter que sur cette rivière de gabarit bien inférieur au Rhône la mortalité due aux turbines est beaucoup plus importante (10 fois plus) que celle estimée pour le Rhône (Heisey et al., 2019).

Une autre expérimentation importante à mener sur le Rhône serait d'évaluer les flux d'anguilles en dévalaison. Des méthodes ont été mises au point et appliquées pendant de nombreuses années sur la Loire à partir de pêches dites « au Guideau ». Un projet a démarré en 2024, soutenu par le COGEPOMI RMC pour tester la faisabilité de cette technique de pêche au Guideau sur le Rhône. Si ce test s'avère positif et que des anguilles argentées sont capturées par le « guideau test », alors il serait possible d'envisager dans le même temps de marquer ces anguilles pour réaliser l'expérimentation sur l'effet du cumul des aménagements.

A la fin du projet, nous avons organisé un séminaire d'experts francophones de la dévalaison de l'anguille argentée. L'objectif était de présenter les résultats du projet Daarac et de les confronter aux connaissances des experts. Un résumé des échanges est donné en annexe. Une nouvelle version de ce séminaire pourrait s'organiser dans les années à venir pour échanger sur les nouvelles connaissances acquises sur cette phase importante dans le cycle de vie de l'anguille et pourtant peu facilitée sur les rivières aménagées pour la production hydroélectrique. Par exemple, le Séminaire du programme R&D Anguilles-Ouvrages des 28 et 29 novembre 2011 à Paris (Les rencontres de l'ONEMA), posait la question suivante : quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages? L'objectif d'un deuxième séminaire avec les

experts, plus de 15 ans après celui de l'ONEMA à Paris, serait de tenter de faire un bilan avec l'apport des nouvelles connaissances sur la dévalaison de l'anguille argentée.

Perspectives de gestion

D'après Heisey et al. (2019), les turbines qui équipent les usines du Bas-Rhône ont individuellement un impact limité sur les anguilles dévalantes (7 % max de mortalité). La succession des aménagements sur le fleuve Rhône pose toutefois la question des impacts cumulés. Il n'est pas impossible pour une anguille de rejoindre la mer, mais pour beaucoup d'individus, le succès de migration est incertain. Et pour celles qui rejoignent la mer, la question qui se pose maintenant est leur condition physiologique à l'issue de leur exposition aux polluants lors de leur phase de vie dans les cours d'eau puis de leur dévalaison. Seront-elles capables de rejoindre la mer des Sargasses et de s'y reproduire efficacement ? Les causes du déclin suspectées (non hiérarchisées) en fonction du stade de vie de l'anguille (océanique et continental) sont multiples. Au cours de leur développement en milieu continental, les anguilles doivent en effet faire face à de nombreuses pressions telles que le parasitisme ou la pollution de l'eau qui peuvent réduire leurs capacités de migration et leur fitness (Drouineau et al., 2018 ; Bourillon et al., 2022).

Un des objectifs majeurs pour le moment, concernant la dévalaison des anguilles argentées à travers les aménagements hydroélectriques du Bas Rhône, est de trouver la meilleure stratégie d'atténuation de l'effet de cumul des aménagements, sachant que le passage via le barrage et le tronçon court-circuité représente une proportion limitée (20%) des dévalaisons observées (d'après nos résultats ou ceux de Trancart et al. (2018) par exemple). Certaines approches (arrêt ou réduction de turbinages de nuit et augmentation des débits déversés au barrage lors des pics de dévalaison) expérimentées ou mises en œuvre sur d'autres cours d'eau présentant des débits plus faibles, sont des solutions d'atténuation des mortalités lors du passage par les anguilles. Mais elles semblent très complexes à mettre en œuvre sur un fleuve comme le Rhône au regard du besoin énergétique dans ces périodes de l'année, du transport fluvial et des enjeux de sureté hydraulique notamment vis-à-vis des inondations. Ces approches nécessiteraient des études et des phases de négociation longues ainsi que le développement d'autres sources de production d'énergie renouvelable pour compenser les pertes de production liées à l'arrêt ou réduction de turbinage. Hors le déclin des populations d'anguilles européennes ne permet plus à cette espèce de disposer de ce temps long.

Existerait-il d'autres solutions, permettant de « guider » les anguilles vers un système de franchissement de l'usine moins traumatique ? L'utilisation du déversoir pourrait peut s'envisager, en s'assurant que la chute ne soit pas trop importante. Mais le guidage des anguilles n'est pas encore au point pour des grands fleuves tels que le Rhône. Des grilles orientées permettant de guider les anguilles vers le barrage, comme présentées par Motyka et al. (2024), est une solution techniquement inenvisageable sur le Rhône, ne serait-ce que pour assurer la navigabilité du bas Rhône. En revanche l'utilisation de turbines dites ichtyo-compatibles pourrait être une piste envisageable à condition de disposer de technologies adaptées au contexte des ouvrages hydroélectriques du Rhône et avec des rendements énergétiques proches de ceux des équipements existants. Des développements sont en cours et des réflexions sont menées notamment dans le cadre de projets européens en lien avec la réhabilitation des ouvrages hydro-électriques comme Rehydro (Demonstration of Sustainable Hydropower Refurbishment) et RevHydro (Revolutionary Refurbishment for an Efficient and Eco-friendly Hydropower), projets dans lesquels les acteurs de la filière hydroélectriques – dont CNR - sont engagés depuis 2024.

D'autre part, compte-tenu de la forte productivité des lagunes méditerranéennes, de la moindre exposition des anguilles aux pollutions et du délai plus court pour atteindre les stades d'argentures, il paraît important de réfléchir à l'échelle du bassin Rhône Méditerranée Corse à une priorisation des actions les plus efficaces sur la façade méditerranéenne et sur les fleuves les plus productifs en termes d'anguilles aptes

à atteindre la mer des Sargasses et à s’y reproduire. Mais attention les milieux saumâtres produisent potentiellement plus de mâles que de femelles au contraire des milieux d’eau douce (Hoste et al., 2024), comme le bassin du Rhône, produisent potentiellement plus de femelles. Enfin les anguilles des lagunes méditerranéennes ne sont pas indemnes de contaminations par des polluants ni d’infection parasitaires (ex *Aguillicola crassus* ; Hoste, 2024).

Campton et al. (2013) annonçaient que le Rhône est identifié comme rivière Index du bassin Rhône-Méditerranée par le Plan de gestion Anguille de la France. Le recrutement est d’ores et déjà assuré par le suivi des passes pièges à anguilles de l’aménagement hydroélectrique de Beaucaire depuis 2006. En revanche, il n’existe aucun dispositif de suivi de la dévalaison (Plan de Gestion Anguille France, 2024). Ainsi, le PLAGEPOMI 2010-2014 souligne la nécessité de définir une méthode permettant d’estimer l’échappement en anguilles argentées sur le Rhône et les fleuves côtiers méditerranéens et d’approfondir les connaissances relatives à la migration de dévalaison en Rhône Méditerranée. Le projet de transférer la technique Guideau sur le Rhône est né de là, mais commence juste à être initié, 11 ans plus tard. La représentation graphique devenue malheureusement célèbre de l’effondrement des stocks d’anguilles européennes, représentés par une estimation de l’abondance relative en anguilles jaunes sur la Figure 45 nous enjoindrait pourtant à aller plus vite (cf la [résolution du Parlement Européen](#) du 21 novembre 2023).

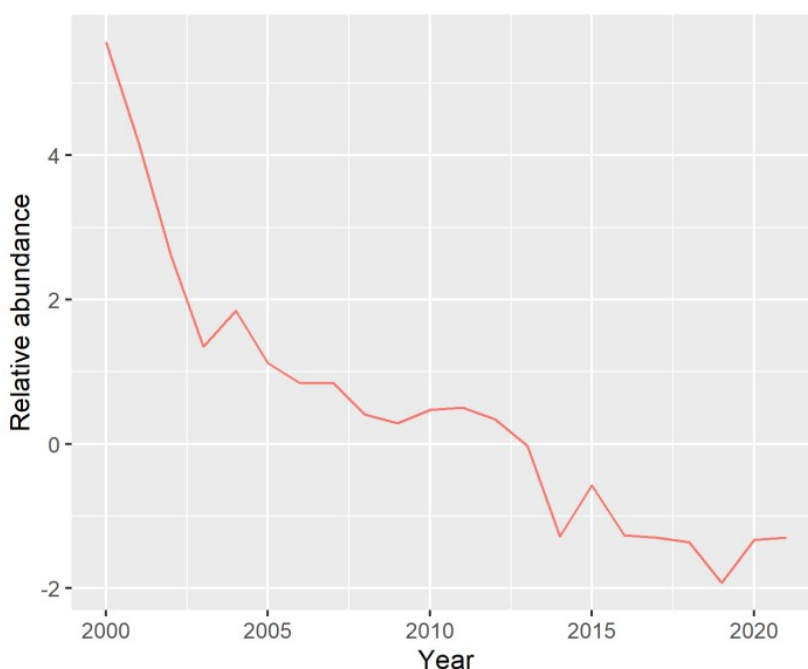


Figure 45 : Estimation de la tendance commune pour l’abondance d’anguilles jaunes entre 2000 et 2021 (from Ices 2022 - Scientific Reports VOL 4(62))

Enfin, la question des quotas de pêche, notamment en mer, qui ont augmenté de 12% en 2024 ne va pas dans le sens voulu (Cf. par exemple Plan de Gestion Anguille France. 2024 – p61-63 et le Projet d’arrêté de gestion du quota d’anguille européenne de moins de 12 centimètres pour la campagne de pêche 2024-2025). Dans sa version du 23 septembre 2024 l’ICES (Conseil International pour l’Exploration de la Mer) stipulait très clairement que le principe de précaution conduit à préconiser zéro capture dans tous les habitats en 2024, tant pour les prises récréatives que commerciales et inclut les prises de civelles pour le repeuplement et l’aquaculture (doi.org/10.17895/ices.advice.21907860.v2). En France, en juillet 2023 un groupe d’experts a été mandaté par trois organismes publics (INRAE, MNHN et OFB) pour répondre à une saisine du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du Ministère de l’Agriculture et de l’Alimentation pour estimer « la quantité de civelles susceptible d’être prélevée dans le milieu naturel de manière à atteindre, pour la saison 2023-2024, l’objectif de 60 % de réduction de la mortalité par rapport

à la période de référence 2004-2008, avec une probabilité de 25 %, 50 % et 75 % » (Boulanger et al., 2023).

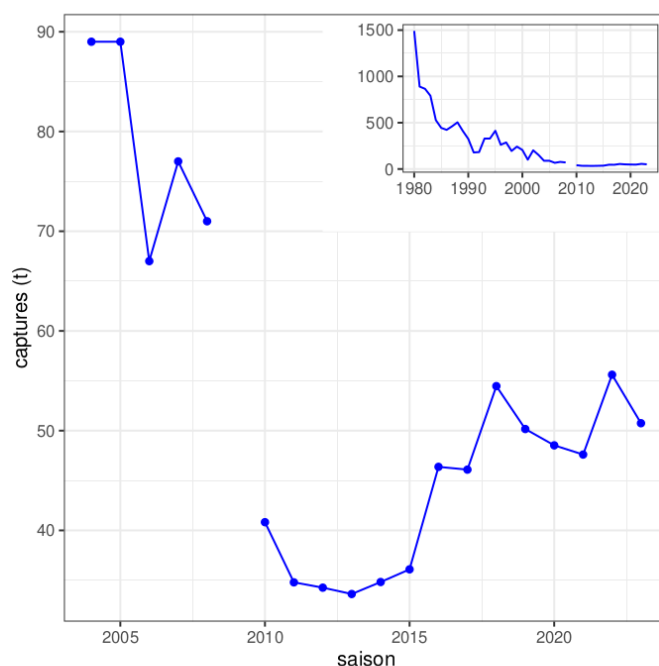


Figure II.5. Captures de 1980 à 2023 (encart en haut à droite), et focus sur le niveau des captures entre 2004 et 2023

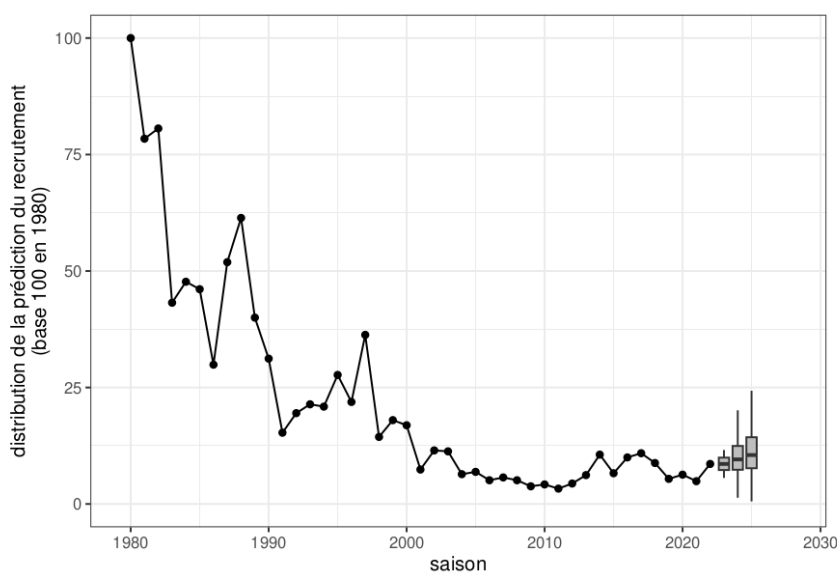


Figure II.3. Évolution du recrutement jusqu'à la saison 2021-2022 (incluse) et distributions des prédictions du recrutement pour les trois saisons suivantes pour le modèle à deux tendances, en incluant les informations rapportées pour 2022-2023. Les boxplots présentent la médiane, les 1er et 3ème quartiles. Les moustaches correspondent à 1,5 fois l'interquartile.

Figure 46 : Figures issues de l'Avis du comité scientifique (INRAE, CNRS, MNHN, OFB) à propos des « Estimations des possibilités de captures totales d'anguilles de moins de 12 cm pour la saison 2023 - 2024 » – (Boulanger et al., 2023). Le modèle d'estimation du recrutement utilisé ici (bas) est le plus optimiste des deux modèles utilisés par le comité scientifique.

Leur conclusion était sans appel : depuis 2015 le quota de pêche à la civelle adopté (60-70 tonnes) est trop élevé par rapport à ce qu'il devrait être pour atteindre les objectifs de reconstitution du stock d'anguilles européennes (30-50 tonnes). Les captures (en tonnes) ont fortement diminué de 1980 (1491 tonnes) à 2011 (34.8 tonnes) avant de repartir à la hausse depuis 2015 (+ 43-55 % entre 2015 et 2023 - Figure 46). Mais dans le même temps, le recrutement lui n'a pas vraiment augmenté de manière certaine et

significative (Figure 46). Et même si les recommandations des scientifiques à l'UE préconisent depuis deux ans un arrêt complet de la pêche à l'anguille sous toutes ses formes et dans tous les pays européens, la France reste sur des quotas de pêche de 65 tonnes pour 2025 (cf. [article de Ethic Ocean](#))

Pour terminer, la conclusion (p169) du rapport de mise en œuvre du Plan de Gestion Anguille France (2024) résume la situation actuelle (juin 2024) de la gestion de l'anguille en France :

« Ainsi, la totalité des actions prévues par le plan de gestion anguille de la France ont été mises en œuvre. Toutefois la reconstitution du stock d'anguilles nécessite une action sur le long terme (le cycle de vie d'une anguille est de 10-12 ans). Les effets de ces mesures ne seront donc pleinement observables qu'à long terme.

L'évaluation de la biomasse d'anguilles argentées quittant le territoire national pour se reproduire (actuelle et pristine) ainsi que de la réduction de la mortalité de l'anguille sur ses stades d'anguille jaune et argentée posent des difficultés. Si des réseaux de suivis ont été mis en œuvre et des modèles ont été développés, il reste délicat de conclure sur ces points.

Il apparaît souhaitable, sur ce sujet ainsi que sur le sujet du repeuplement, de mutualiser les travaux menés par les différents États-membres et de mettre en œuvre des programmes de recherche au niveau européen. Afin de vérifier l'atteinte des objectifs du règlement anguille, il apparaît également indispensable qu'une réflexion soit menée, sous l'égide de la Commission européenne, sur l'harmonisation de l'acquisition des données et des méthodes d'estimation des différents indicateurs. Un cadrage européen sur ces sujets est donc attendu par la France pour une meilleure coordination des actions menées. »



(photo Hervé PELLA – INRAE – août 2019)

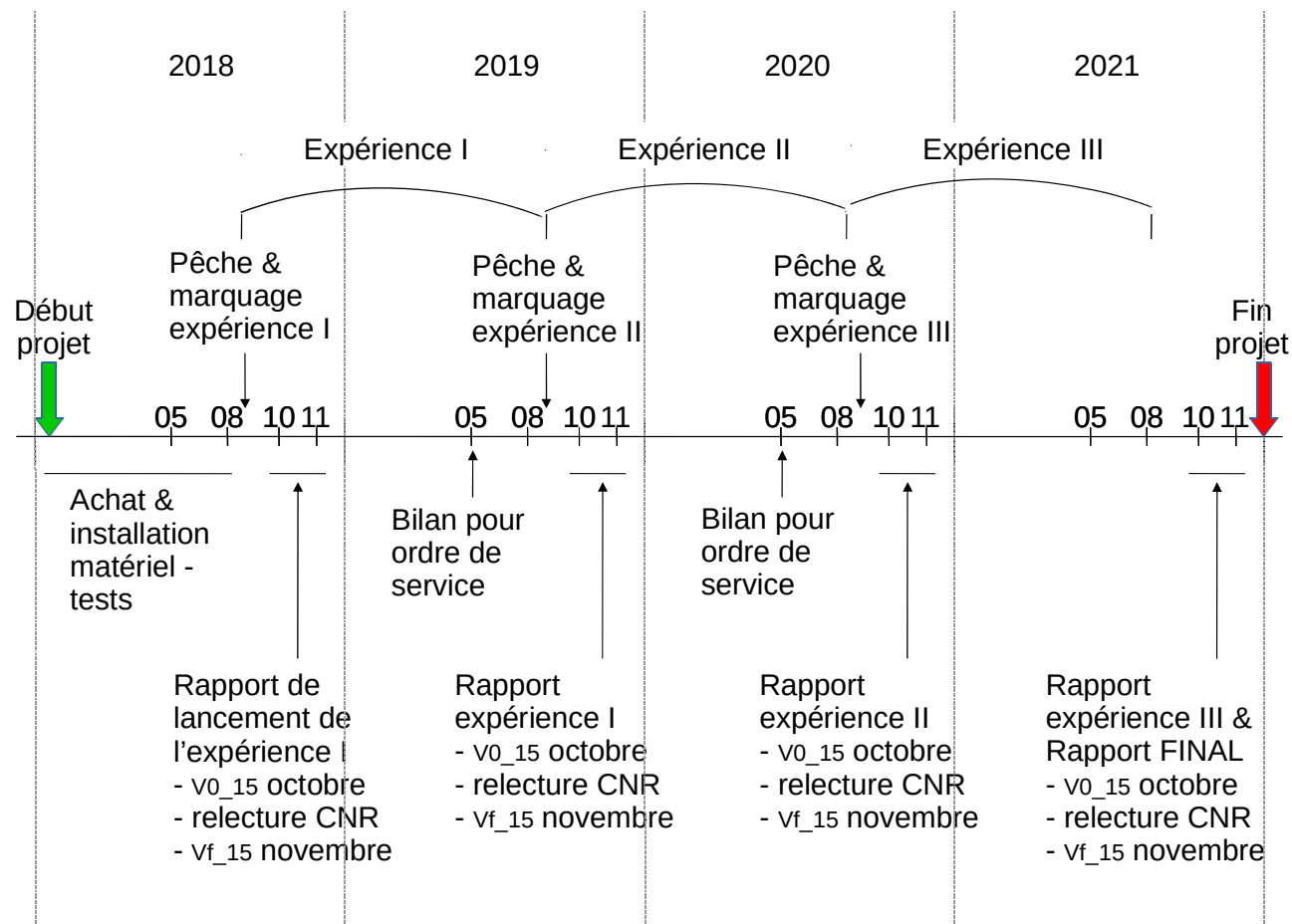


(photo Hervé PELLA – INRAE – septembre 2020)

ANNEXES

1- Feuille de route du projet DAARAC :

noter qu'une année (2021 - 2022) supplémentaire (sans marquage) a été ajoutée à cette feuille de route ; rendu rapport final début 2024.

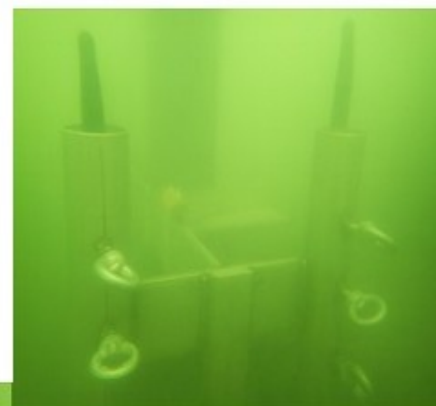


**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

2- Illustrations de l'installation des détecteurs



Position du détecteur de l'Écluse à gauche et du Déversoir à droite



Installation des gaines pour le passage des câbles dans la berge ; IPN planter dans le fond du Rhône pour fixer le porte hydrophone ; exemple de mât béton pour supporter le boîtier abritant l'enregistreur, le modem et le tableau électrique, un boîtier pour la batterie et le panneau solaire ; Balise de navigation (limite du chenal de navigation) qui supporte un porte hydrophone dans le RCC ; deux vues subaquatiques d'un porte hydrophone, des hydrophones (celui connecté et celui de rechange) et un beacon tag fixé au support.



Position du détecteur de Arles Grand Rhône rive Droite (face à VNF) – à gauche ; les enregistreurs sont dans le coffret du limnigraphe CNR-VNF. L'hydrophone est tenu dans l'eau par un lourd support métallique comme pour la rive Gauche (au centre). Pour Arles Petit Rhône (à droite) le support d'hydrophone est fixé à la structure métallique du limnigraphe et l'enregistreur est dans la cabane CNR.

3- Capture – Biometrie – Marquage

(illustration avec des images de la campagne 2018)



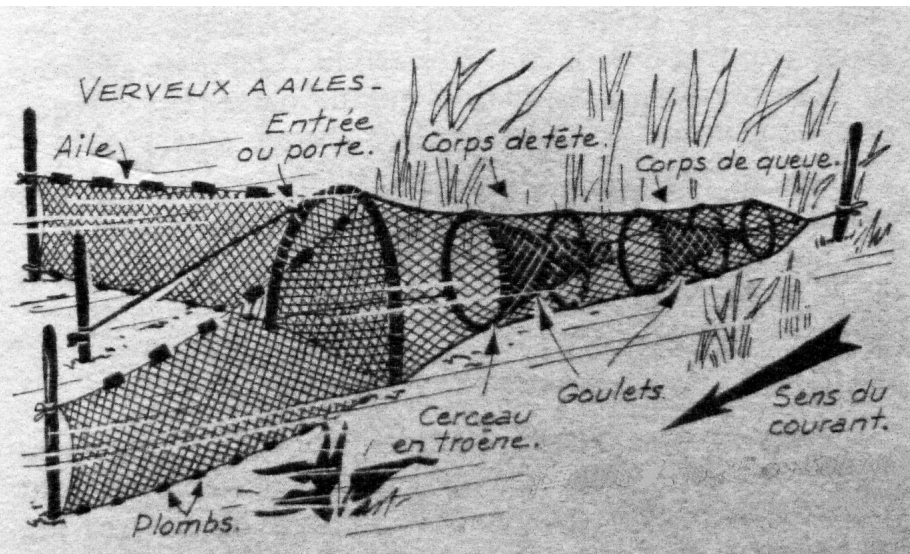
Pêche électrique en bateau (OFB), atelier de marquage et mesures biométriques pour la détermination du stade Durif (diamètre œil ; longueur nageoire pectorale)



Les différentes étapes de l'acte chirurgical d'implantation de la marque dans la cavité intra-péritonéale des anguilles



**Capture des anguilles au verveux
(Pêcheur professionnel J.-L. Fontane)**



Relevé d'un verveux par le pêcheur professionnel JL Fontaine en rive droite du Rhône à ST Etienne des Sorts (haut). Le verveux est ancré « corps de queue » à l'amont et « entrée » à l'aval, regardant vers l'aval. En bas, une description d'un verveu (Par Gegeours — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22955086>). A noter que dans le Rhône, les verveux ont un très grosse entrée et n'ont pas d'ailes.



(HP)



(HP)



(HP)



(HP)



(FG)



(HP)



Photos d'anguilles pendant les mesures de biométries (HP = H. Pella ; FG = F Giroud). Sur la ligne du bas on ausculte une anguille de 2018 recapturée en 2019 (très maigre en comparaison avec une anguille pêchée en 2019). La cicatrice est parfaite. On aperçoit la marque dans le corps de l'anguille amaigrie.



(FG)



(FG)



(HP)



(FG)



(FG)



(HP)

Pêche électrique en bateau (CNR) ; photos F. Giroud.
Reomorque – Viviers de F. Giroud

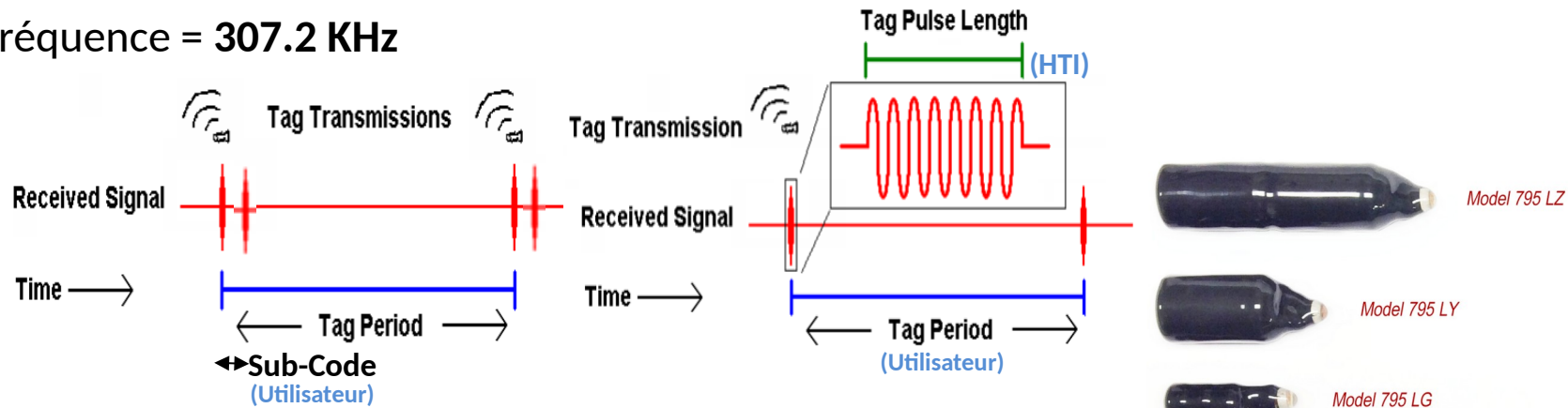
Travail collectif sur le site de biométrie - marquage

4- Extrait de la trame formulaire APAFIS – dossier d'éthique

Description détaillée de la procédure expérimentale	
Pertinence et justification de la procédure expérimentale	<p><u>Chirurgie</u></p> <p>Les poissons sont placés un par un dans le bac d'endormissement couvert et rempli d'eau du Rhône contenant une solution d'Eugénol (dilué à 10 % dans l'éthanol) dosé à $\sim 1.1 \text{ mL L}^{-1}$ en moyenne pour des anguilles de 608 mm à 1020 mm (Drouineau et al. 2017). Le dosage sera à adapter selon la masse du poisson et la température de l'eau, avec une augmentation de la dose jusqu'à 1.3 mL L^{-1} suivant une augmentation de la masse et une baisse de la température. Le poisson est maintenu dans le bac d'endormissement jusqu'au stade de cessation des mouvements operculaires. A ce stade, le poisson anesthésié, placé dans un long support à largeur réglable doté de protections, est maintenu en immersion en décubitus dorsal de manière à ce que les branchies soient constamment irriguées par la solution d'anesthésie et que la partie supérieure de l'abdomen soit hors d'eau. Il est marqué par implantation intrapéritonéale selon le protocole de Baras et Jeandrain (1998).</p> <p>Après désinfection des instruments et marques avec un mélange alcool et Bétadine® et de la surface d'intervention avec la Bétadine®, une incision au scalpel (la lame est changée, donc stérile, pour chaque nouvel individu) de 1.5 à 2 cm de long est pratiquée dans la paroi abdominale au niveau de la partie postérieure de l'intestin et une fois la cavité péritonéale atteinte, l'émetteur acoustique HTI (795LY, 12g, 2 ans ou 795LZ, 24 g, 4 ans avec une période d'émission de 3 sec) est déposé dans la cavité, dans l'axe du corps et en amont de l'incision (partie émettrice de la marque vers la tête du poisson). Ensuite plusieurs points de suture indépendants sont effectués (Monofilament absorbable, ex : Monocryl C395 et C394, Ethicon PDS® II 2-0, 3/8c vc tr 24mm Z453H model ; un fil-aiguille de suture neuf (donc stérile) sera utilisé pour chaque individu) et la cicatrice est badigeonnée de Bétadine. Après avis vétérinaire, une injection intramusculaire d'antibiotique à large spectre et longue action (Shotapen 0.5mL/kg) préventive est pratiquée pour limiter le risque d'infection. En règle générale, l'intervention dure de 7 à 10min.</p> <p><u>Récupération post-chirurgie</u></p> <p>L'anguille marquée est immédiatement transférée dans un bac de réveil (150 L), avec un circuit d'eau continu (pompe et rejeté dans le Rhône) et une oxygénation. Elle y reste jusqu'au stade de regain de l'équilibre et de l'aspect pré-anesthésiques avec recouvrement de la capacité de nage (au moins une heure après l'opération ; cf. 3.4.13).</p> <p><u>Retour des poissons au milieu naturel</u></p> <p>Les poissons sont alors placés dans un bac de transport ($\sim 50 \text{ L}$) rempli aux 2/3, couvert et oxygéné, puis transportés en bateau sur leur lieu de capture et relâchés par groupe de plusieurs individus.</p> <p>Baras E, Jeandrain D (1998). Evaluation of surgery procedures for tagging eel <i>A. anguilla</i> with telemetry transmitters. <i>Hydrobiologia</i>, 371-372: 107-111.</p>

5- Présentation des émetteurs acoustiques (Tags) de chez HTI et de leur fonctionnement

Fréquence = 307.2 KHz

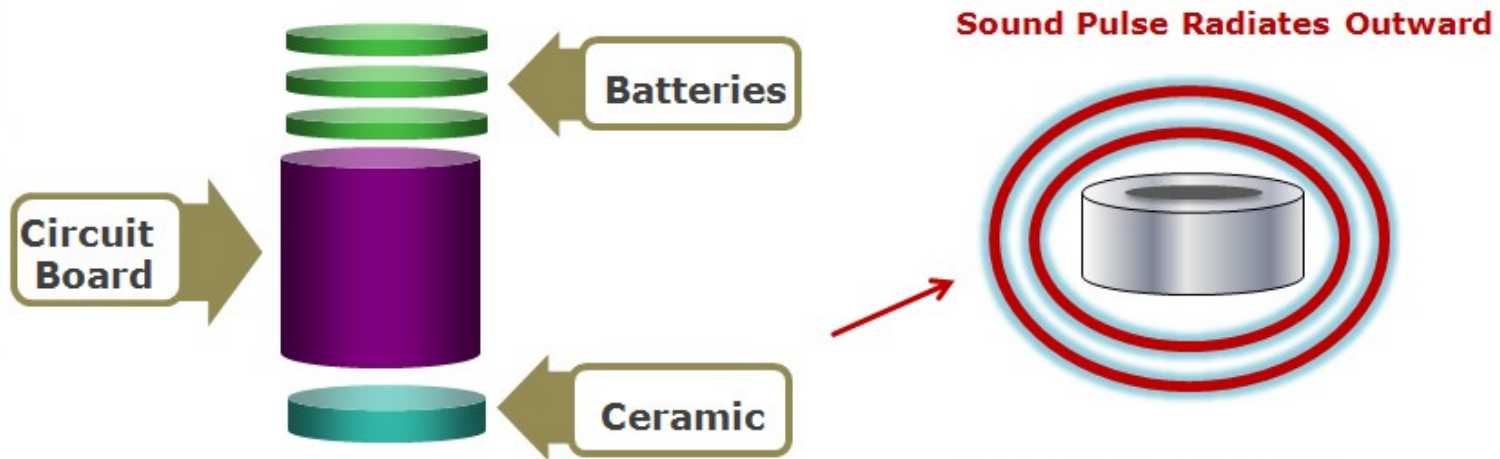


Acoustic Tag Model	Diameter mm	Length mm	Volume cm ³	Source Level dB/uPa	Weight		Approx. Life*	
					in air grams	in fresh-water grams	3 sec PRI	10 sec PRI
Model 795-Lm	6.8	17.5	0.28	149	0.65	0.34	38 d	66 d
Model 795-LD	6.8	20.0	0.45	149	1.10	0.55	98 d	175 d
Model 795-LG	11.0	25.0	1.40	152	4.60	3.10	220 d	400 d
Model 795-LY	16.0	48.0	5.70	152	11.90	7.30	2.5 yr	4 yr
Model 795-LZ	16.0	69.0	12.0	152	24.00	14.00	4 yr	5 yr

Model 900-s	6.0	16.0	0.28	152	0.57	0.29	~ 35 d	~ 65 d
Model 900-Lm	6.0	19.0	0.31	152	~ 0.65	~ 0.34	~ 55 d	~ 100 d
Model 900-LB	9.0	18.0	0.50	152	0.80	0.30	70 d	125 d
Model 900-LD	9.0	20.0	0.56	152	~ 0.96	~ 0.40	~ 110 d	~ 200 d



Acoustic Tags What are They?



Surgically Tagging Fish

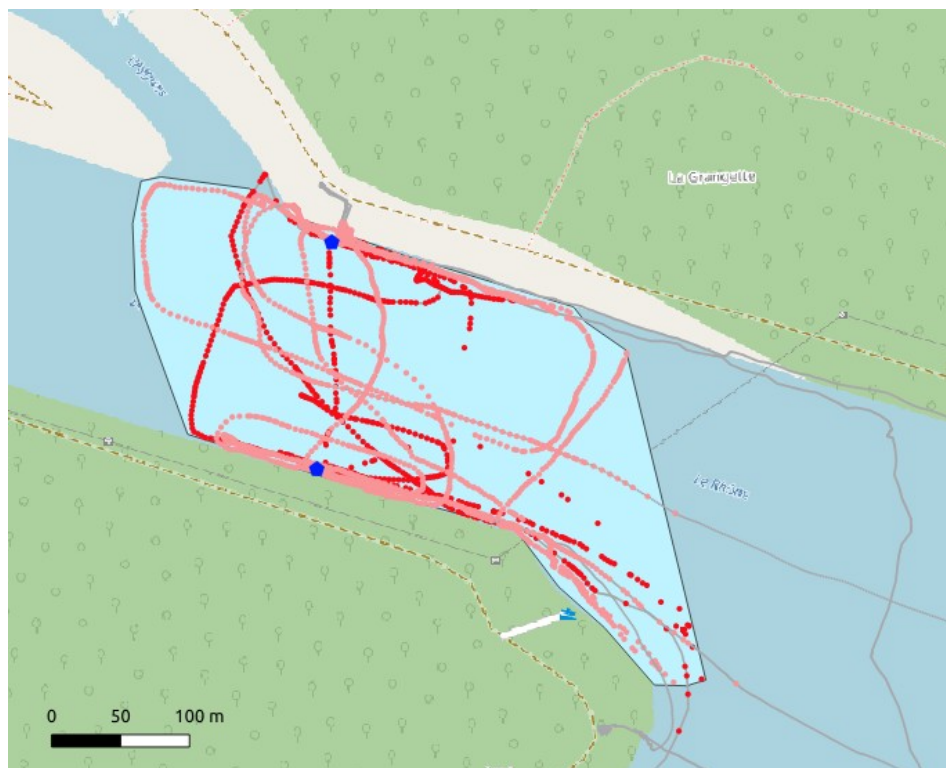
Tag Life: # batteries (50 days to 4 yrs)



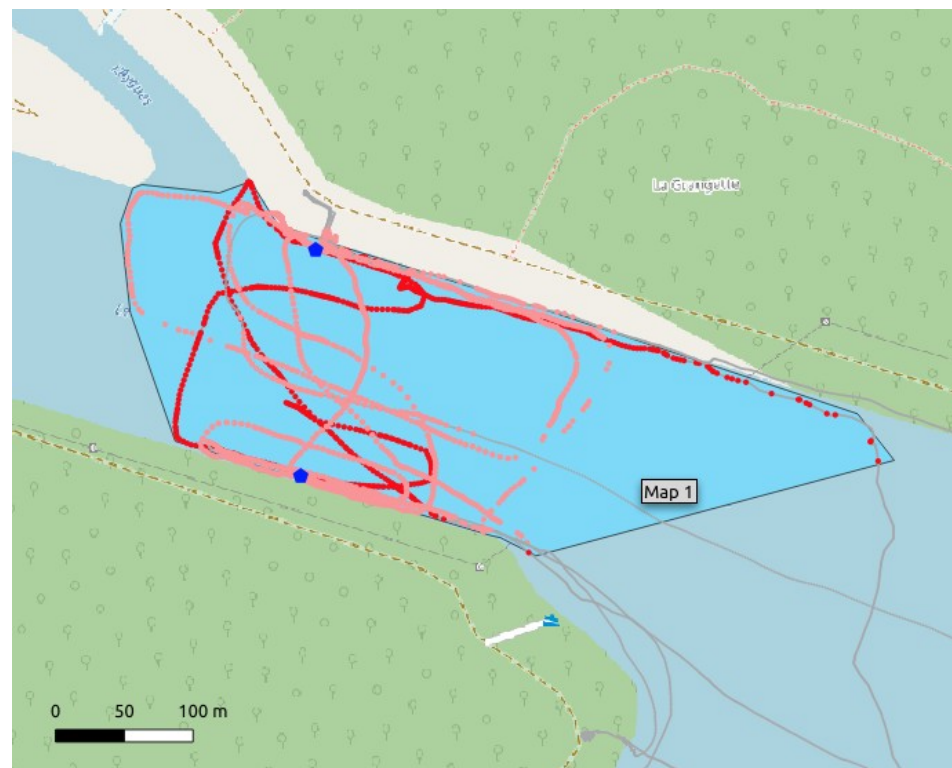
6- Tests de détection

Aval Usine – PK218

points colorés = détection par l'hydrophone



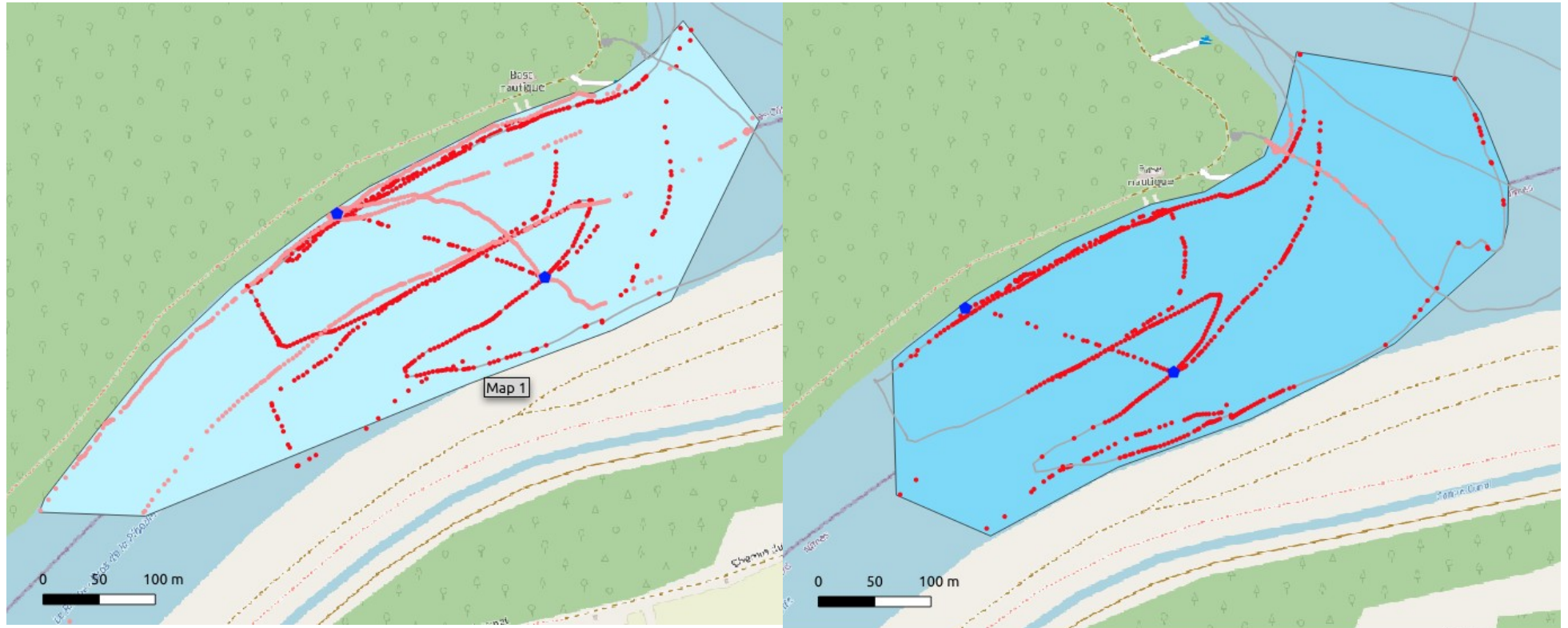
Aval_Usine_RG, 20181128 en rouge et 20190313 en rose



Aval_Usine_RD, 20181128 en rouge et 20190313 en rose

RCC – PK218

points colorés = détection par l'hydrophone

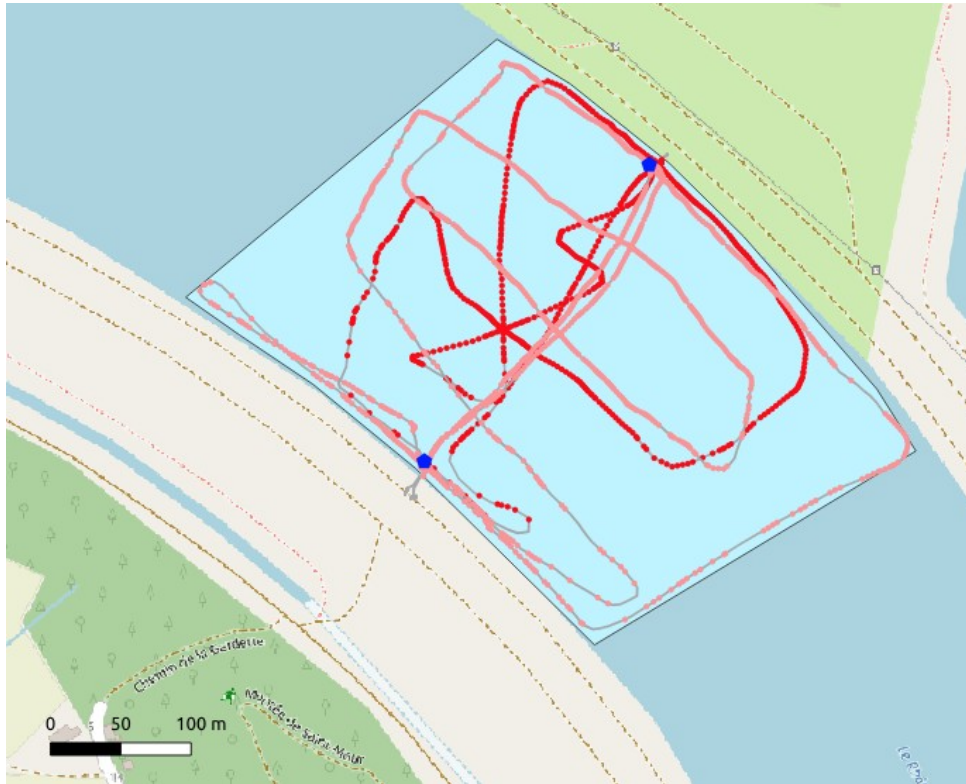


RCC_RG, 20190910 en rouge et 20190313 en rose

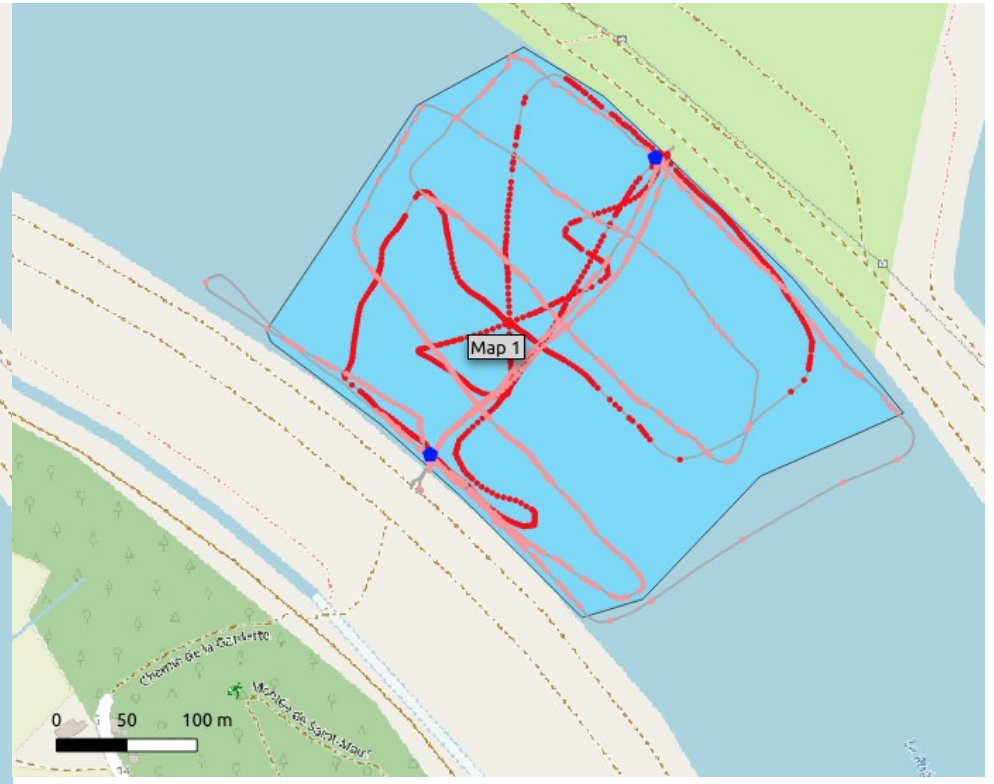
RCC_RD, 20190910 en rouge et 20190313 en rose

PK220

points colorés = détection par l'hydrophone



PK220_RG, 20180828 en rouge et 20190311 en rose



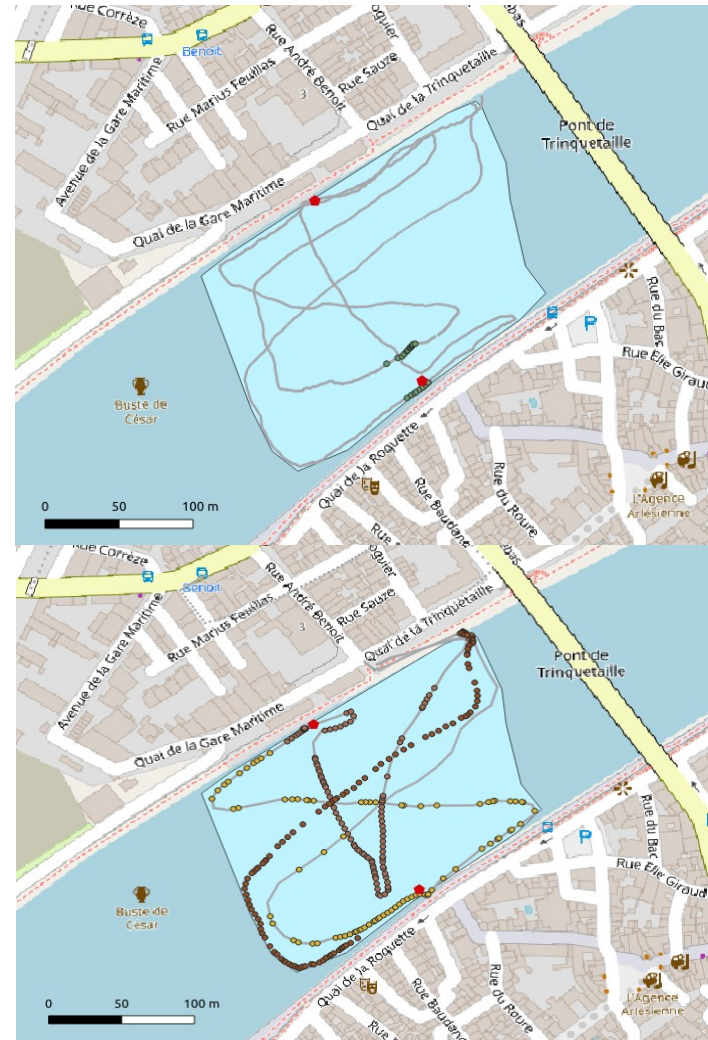
PK220_RD, 20180828 en rouge et 20190311 en rose

ARLES – Grand Rhône – PK282.6

points colorés = détection par l'hydrophone



Arles_RG, 20181002 en rouge et 20190911 en rose



Arles_RD, 20181002 en haut (problèmes techniques) et 20190911 en bas

7- Fonctionnement des détecteurs sur les quatre années d'étude

- AN1 _[20180820 – 20190430]
- AN2 _[20190501 – 20200430]
- AN3 _[20200501 – 20210430]
- AN4 _[20210501 – 20220430]

(un détecteur = un hydrophone ; voir Annexe 2)

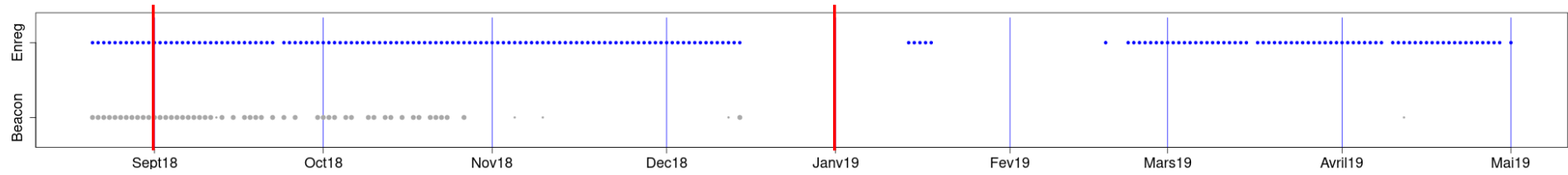
Les lignes « Enreg » représentent les fichiers post traités. Si un symbole bleu est présent cela signifie que cette journée a été correctement analysé. Un seuil de 4 Mo sur la taille des fichiers post traité a été imposé. Si la taille du fichier est supérieure cela signifie qu'il y avait beaucoup trop de bruit dans le milieu ambiant pour faire une traitement des données correct.

Les lignes « Beacon » représentent la détection des tags tests installé pour savoir si l'hydrophone fonctionne bien, i.e. entend le tag Beacon. Si un symbole gris est présent cela signifie que pour cette journée là, l'hydrophone a entendu les tag beacon.

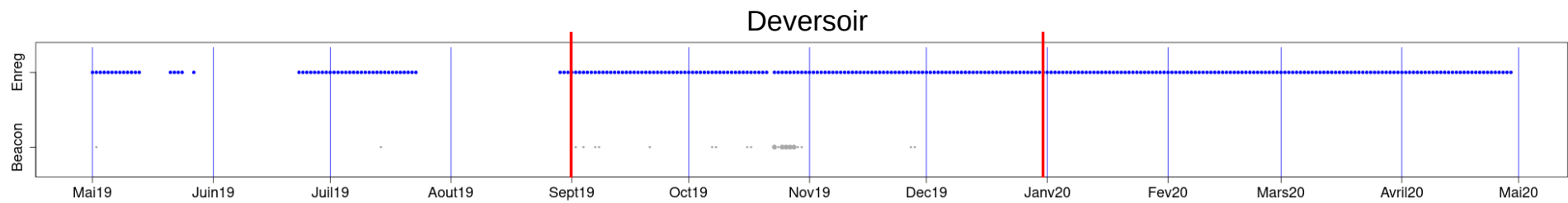
Les barres rouges verticales sont les débuts (septembre, donc le marquage en 2018, 2019 et 2020) et les fins de périodes pendant lesquelles la majorité des passages d'anguille ont été enregistrés. C'est sur ces périodes que nous avons évalué la qualité d'écoute du milieu par notre système.

Déversoir

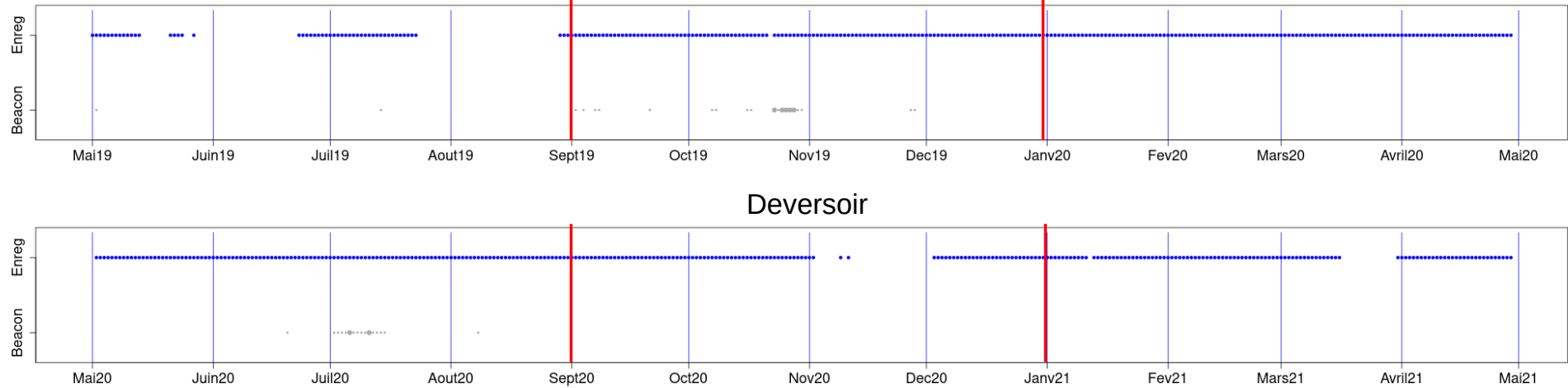
Deversoir



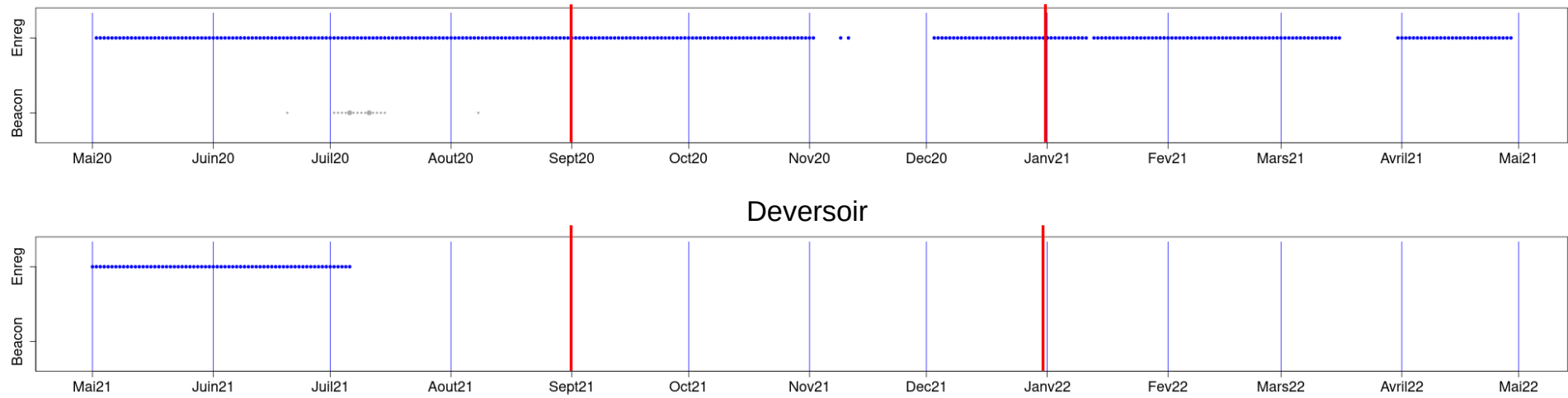
Deversoir



Deversoir



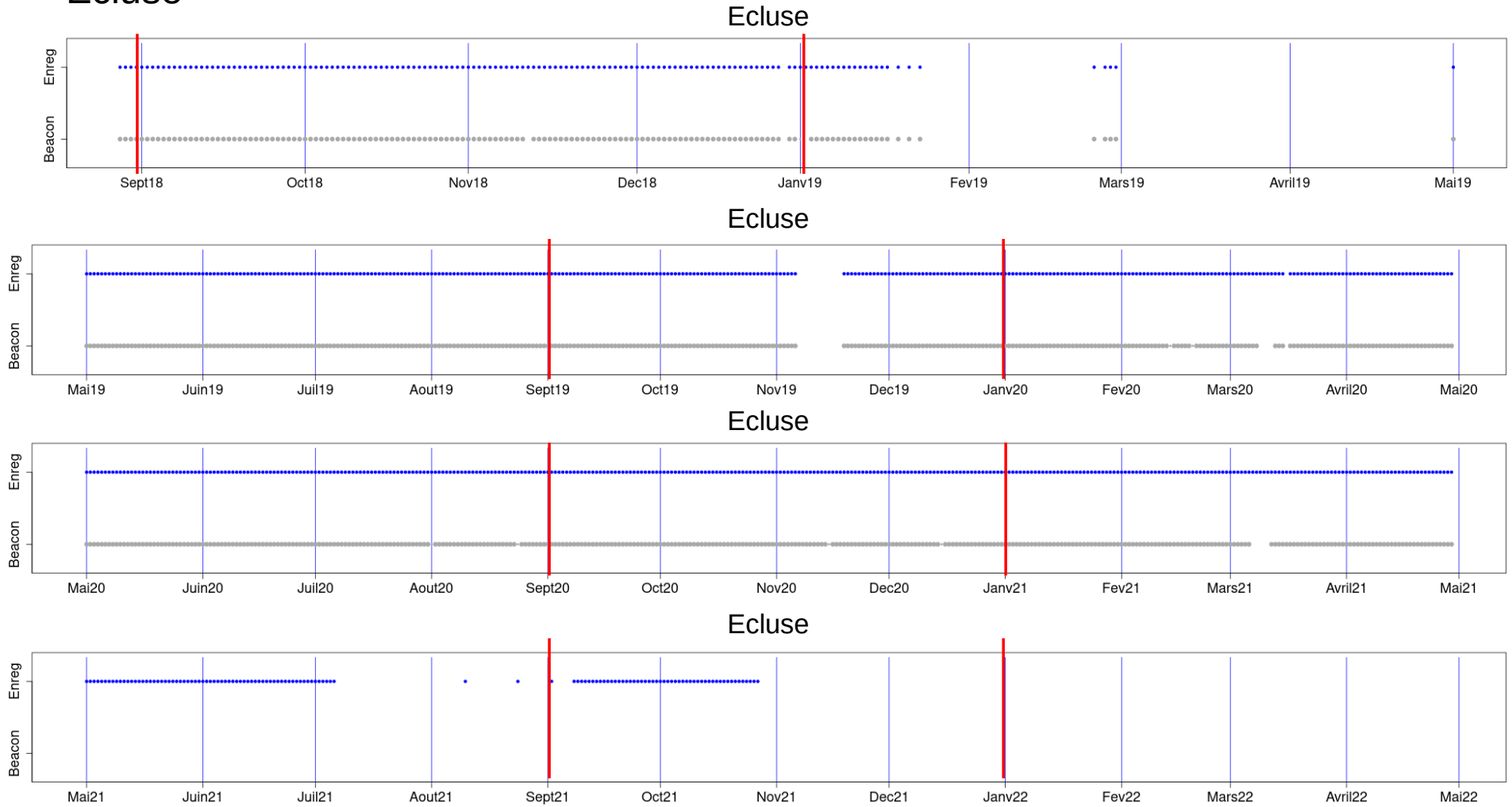
Deversoir



Deversoir

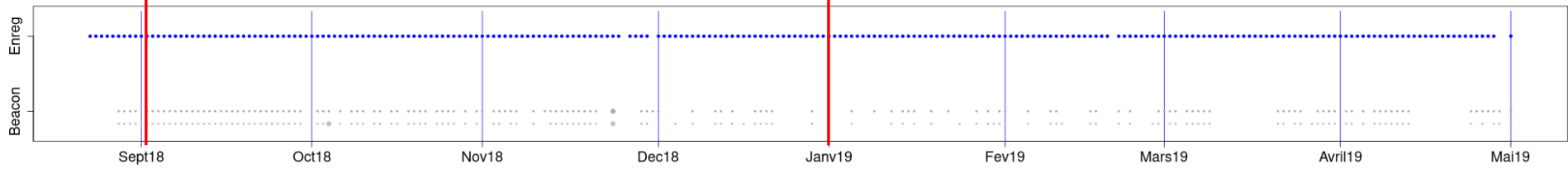
Écluse

Ecluse

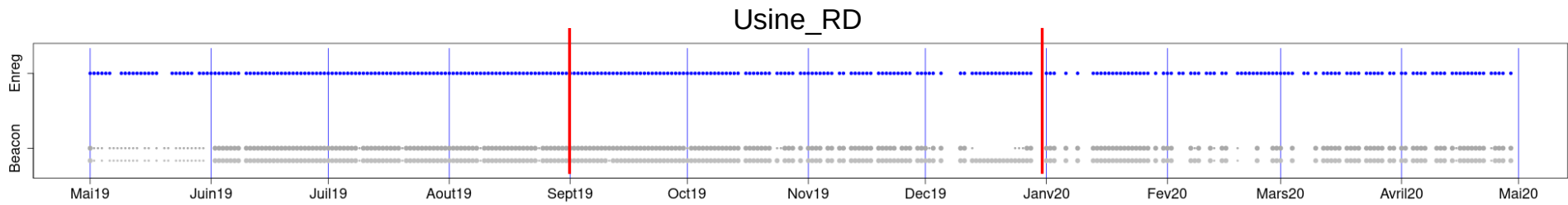


Usine

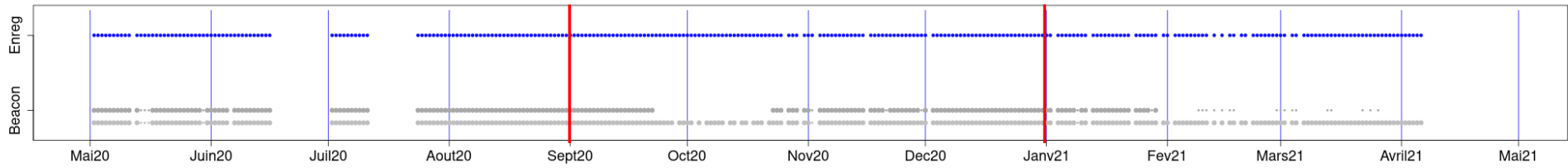
Usine_RD



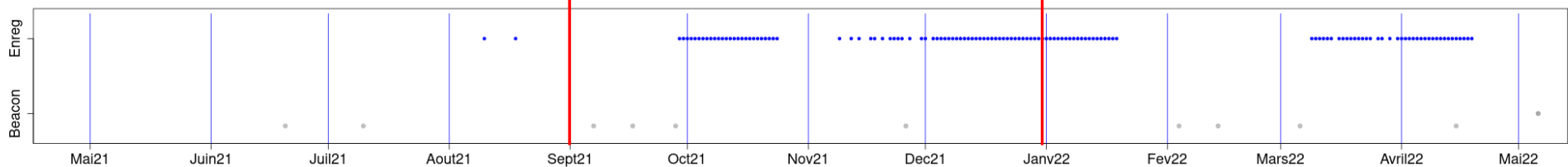
Usine_RD



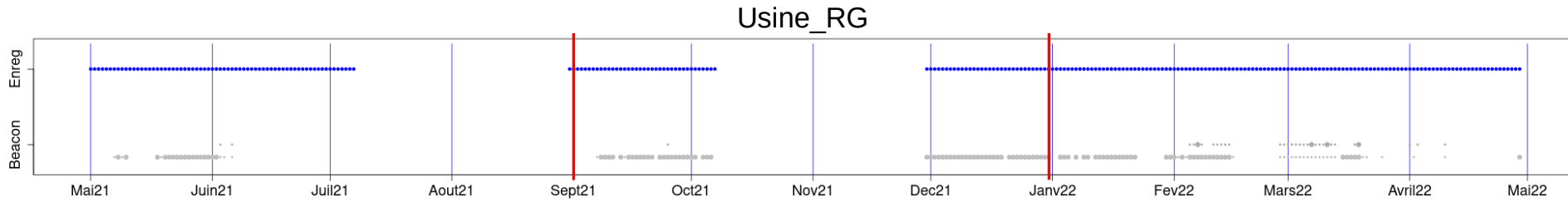
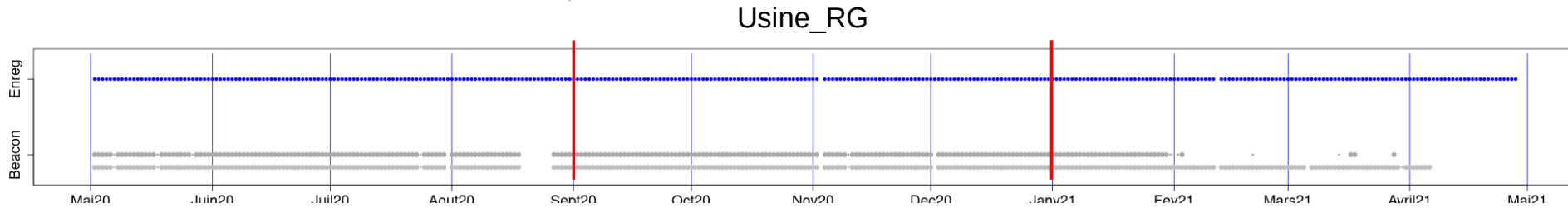
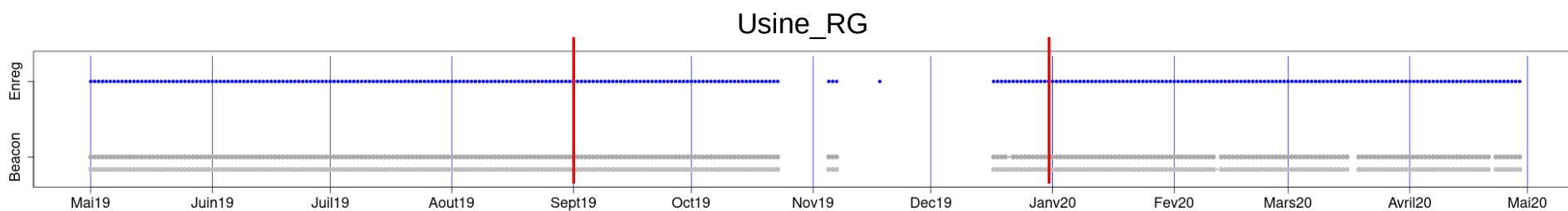
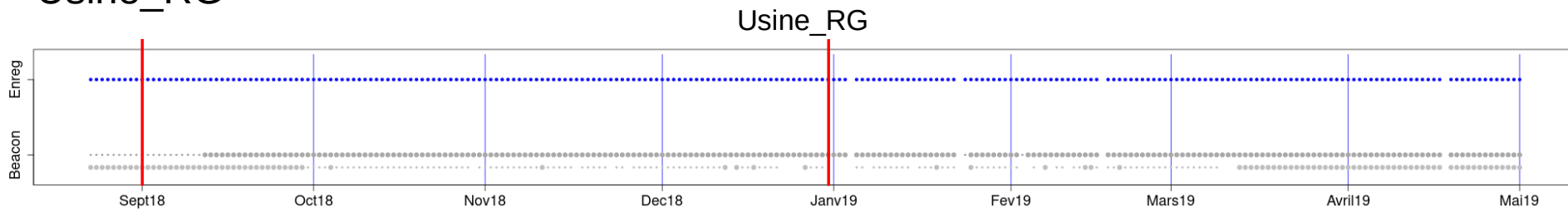
Usine_RD



Usine_RD

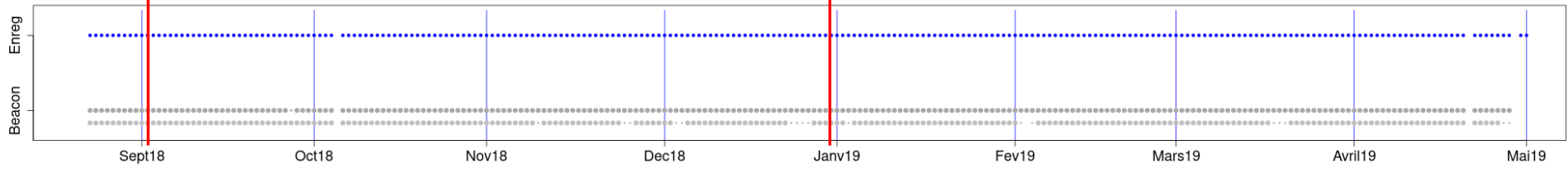


Usine_RG

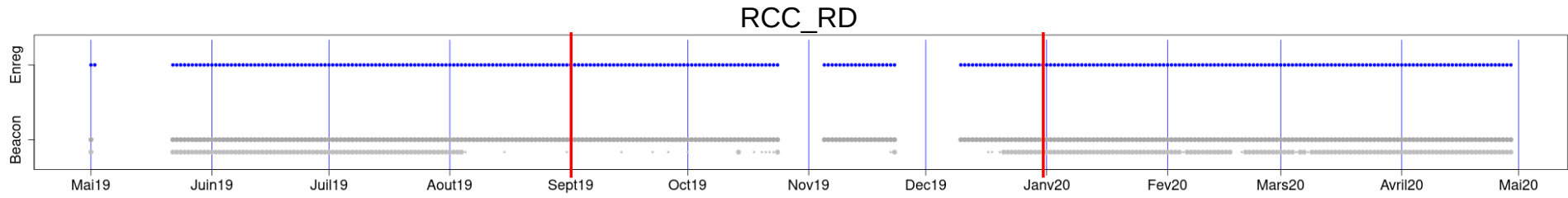


RCC

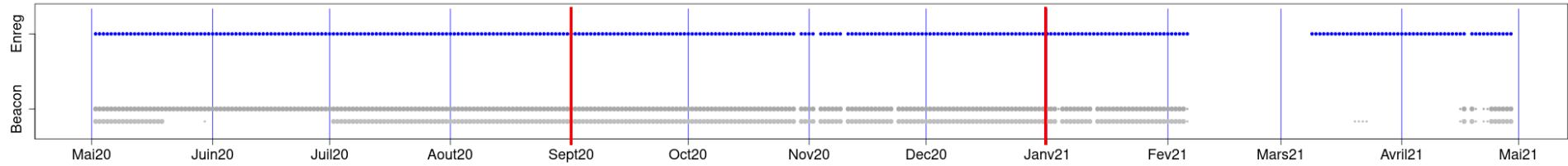
RCC_RD



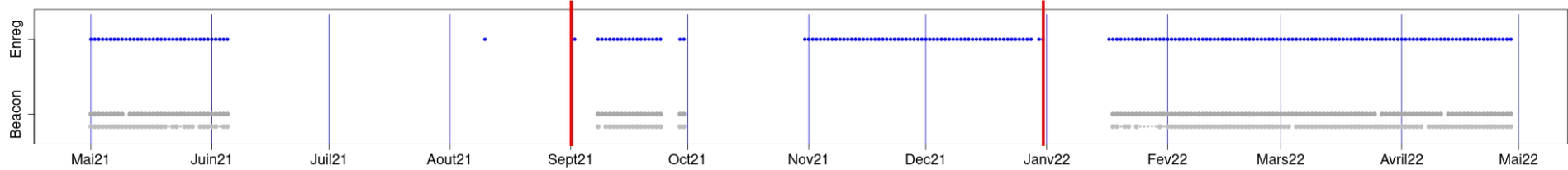
RCC_RD



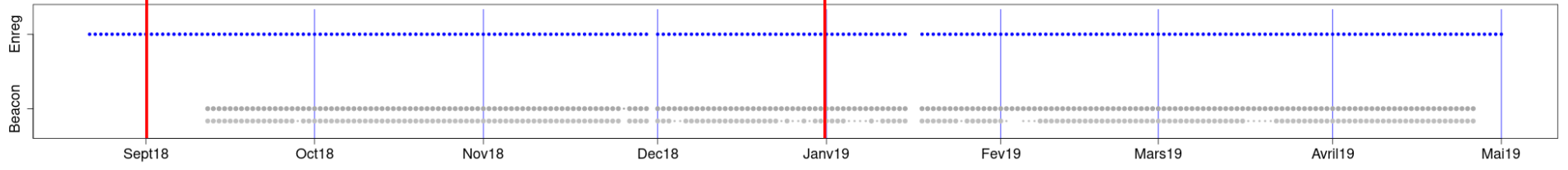
RCC_RD



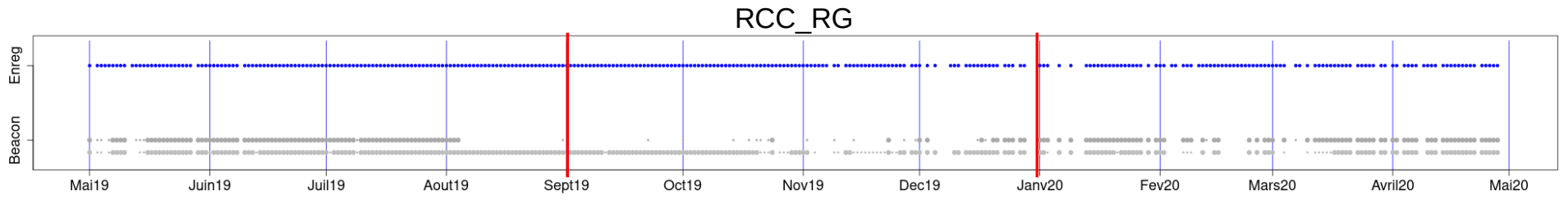
RCC_RD



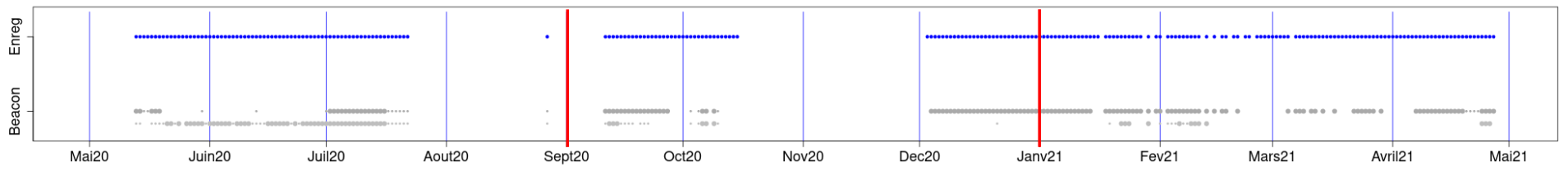
RCC_RG



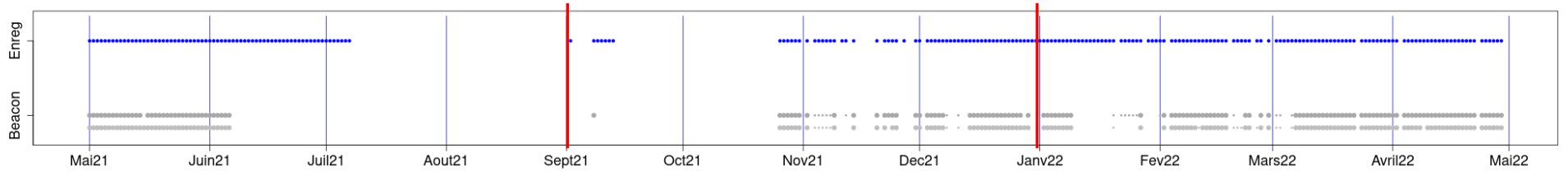
RCC_RG



RCC_RG

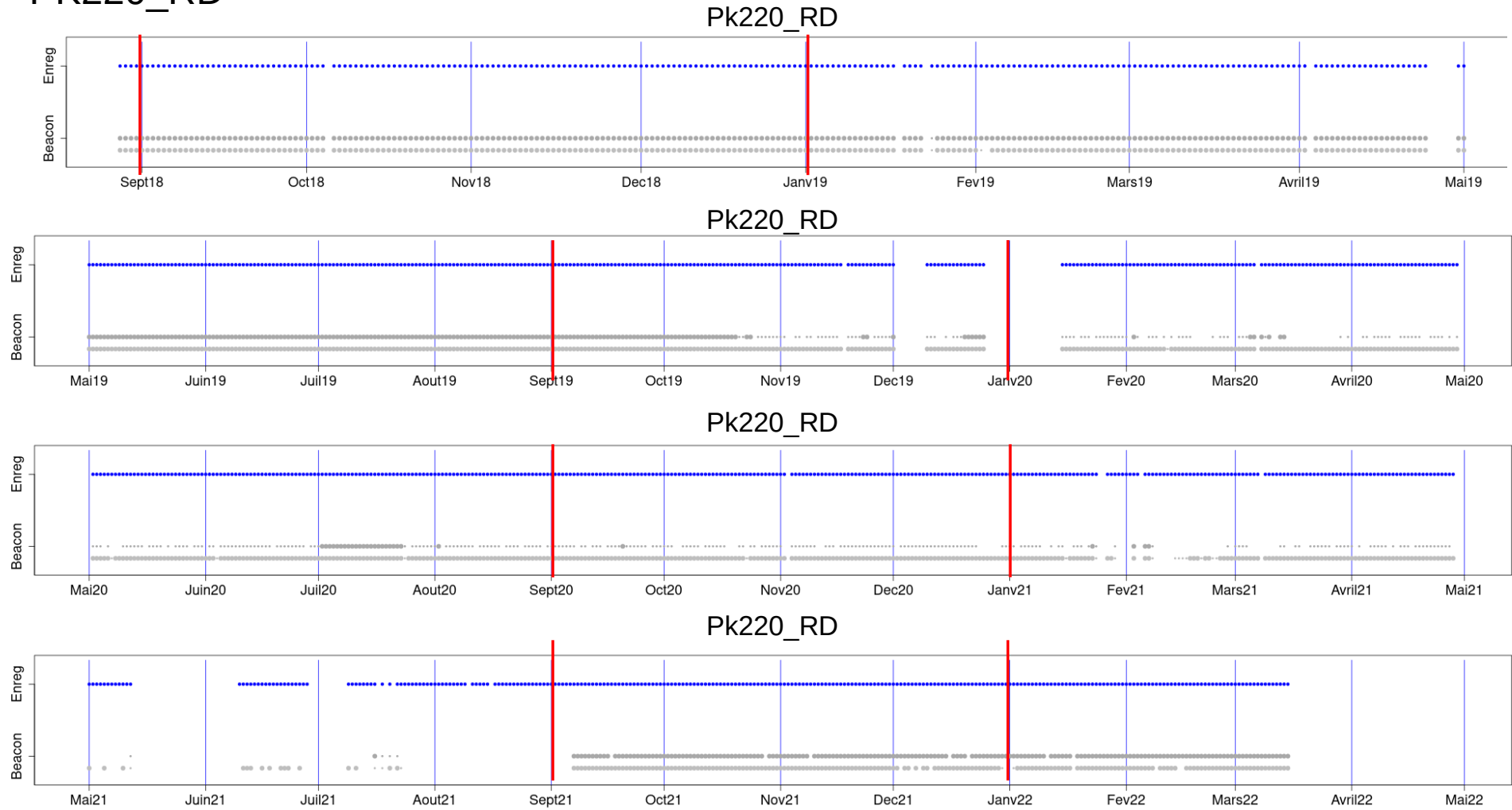


RCC_RG



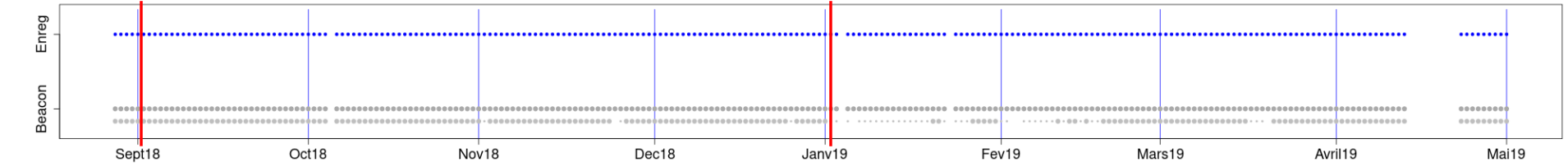
Pk220

PK220_RD

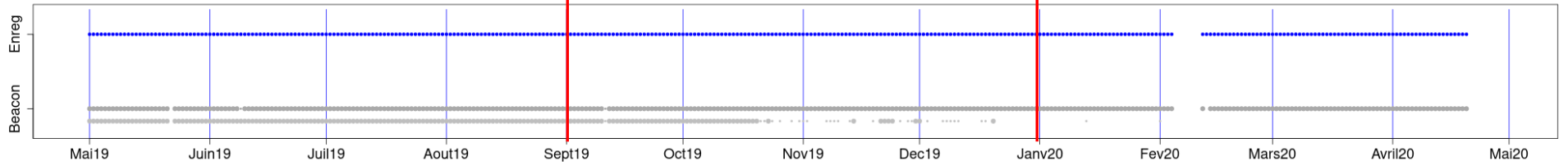


PK220_RG

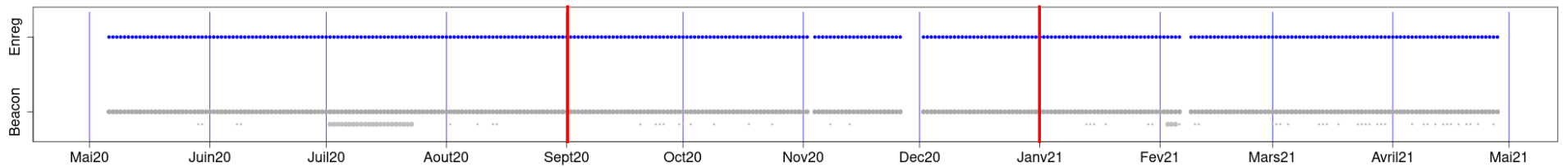
PK220_RG



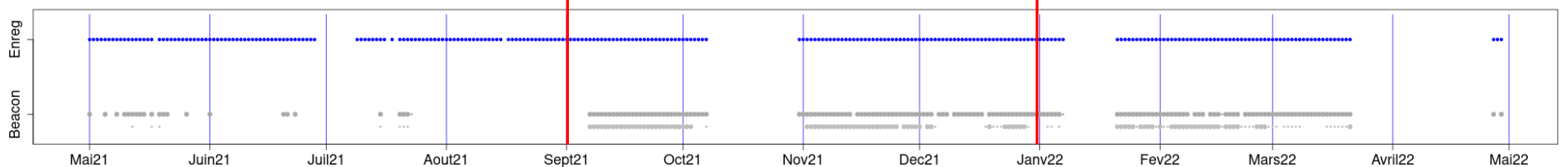
PK220_RG



PK220_RG

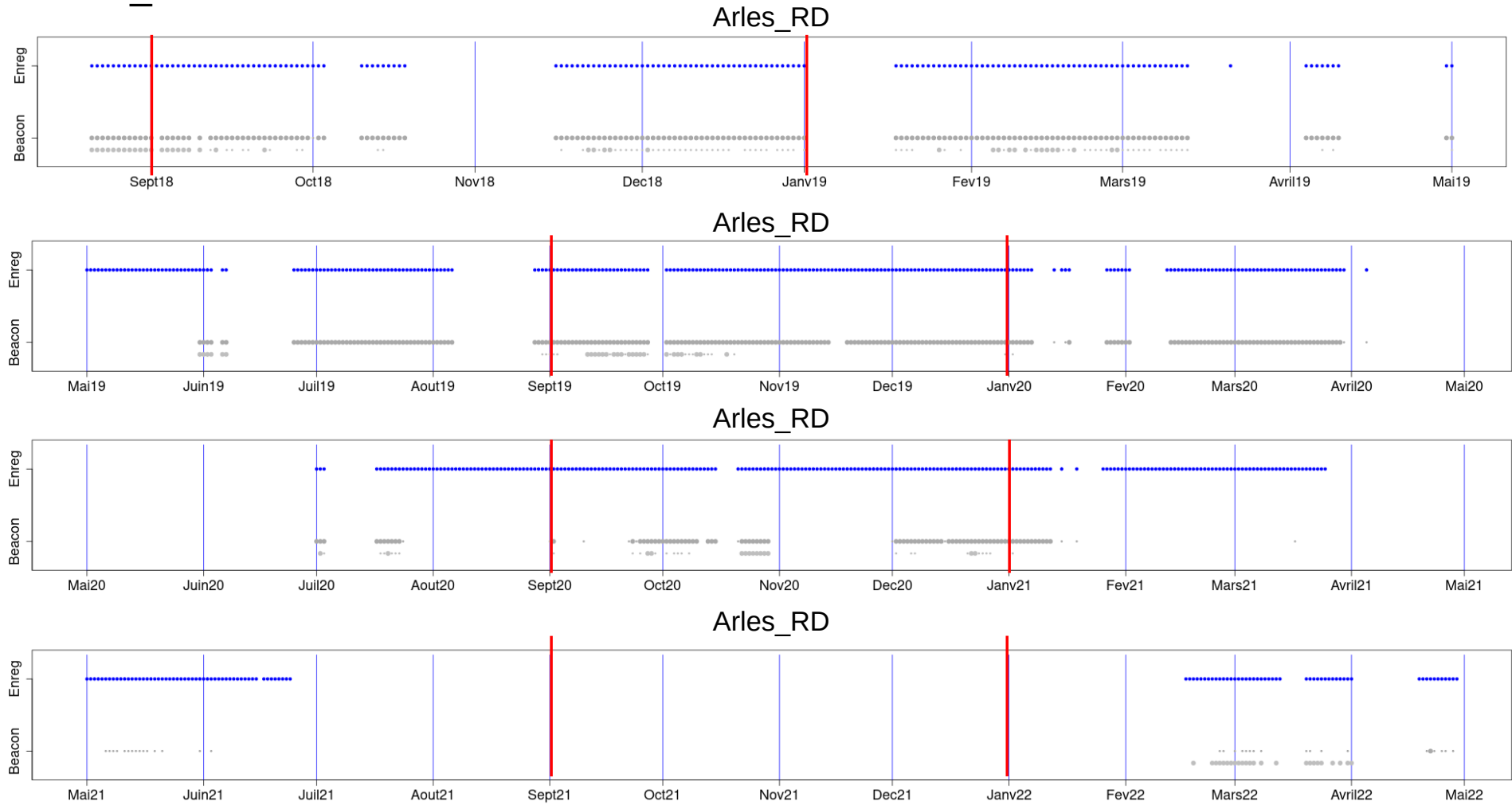


PK220_RG

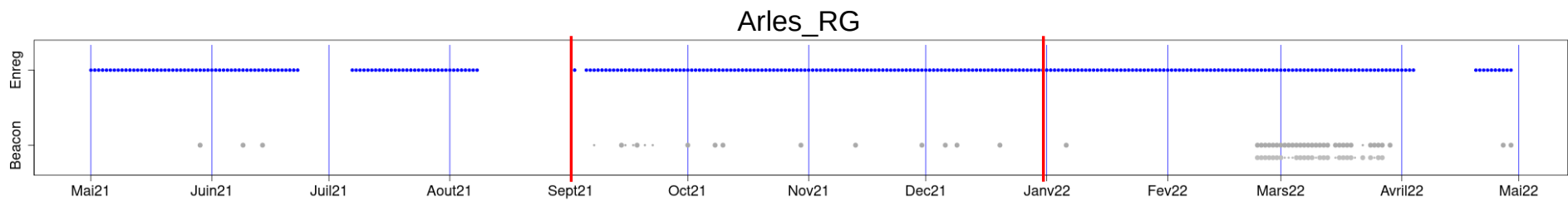
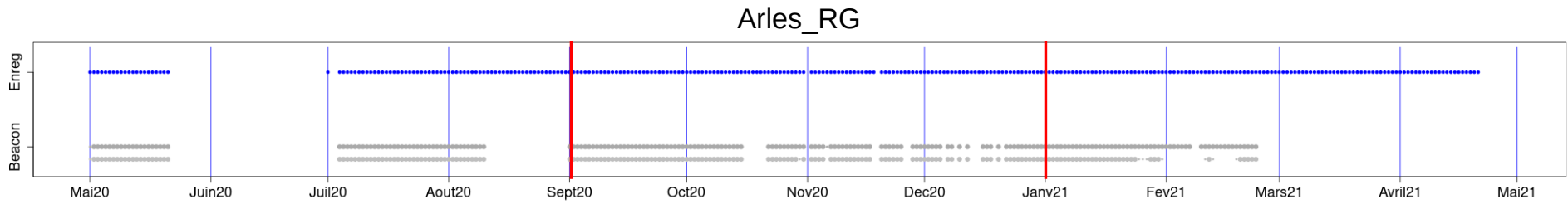
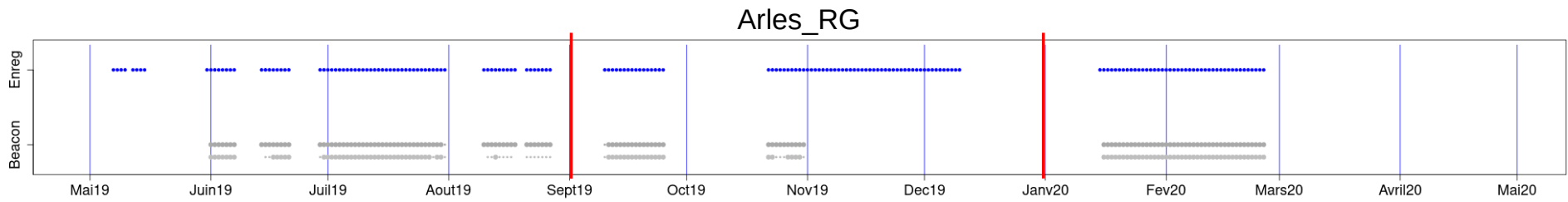
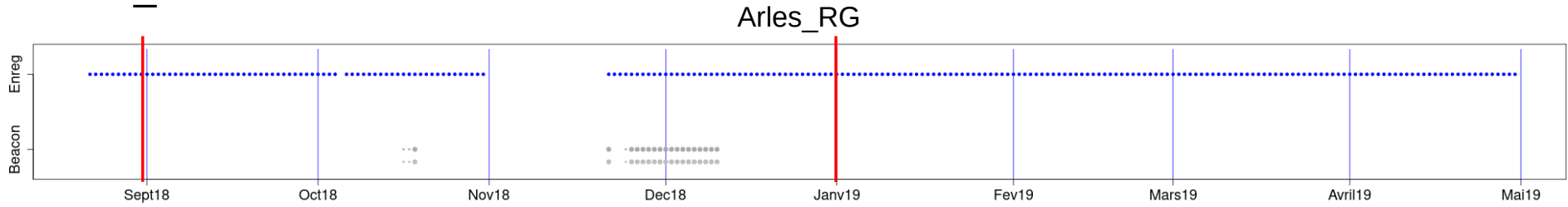


Arles_Grand_Rhône

Arles_RD

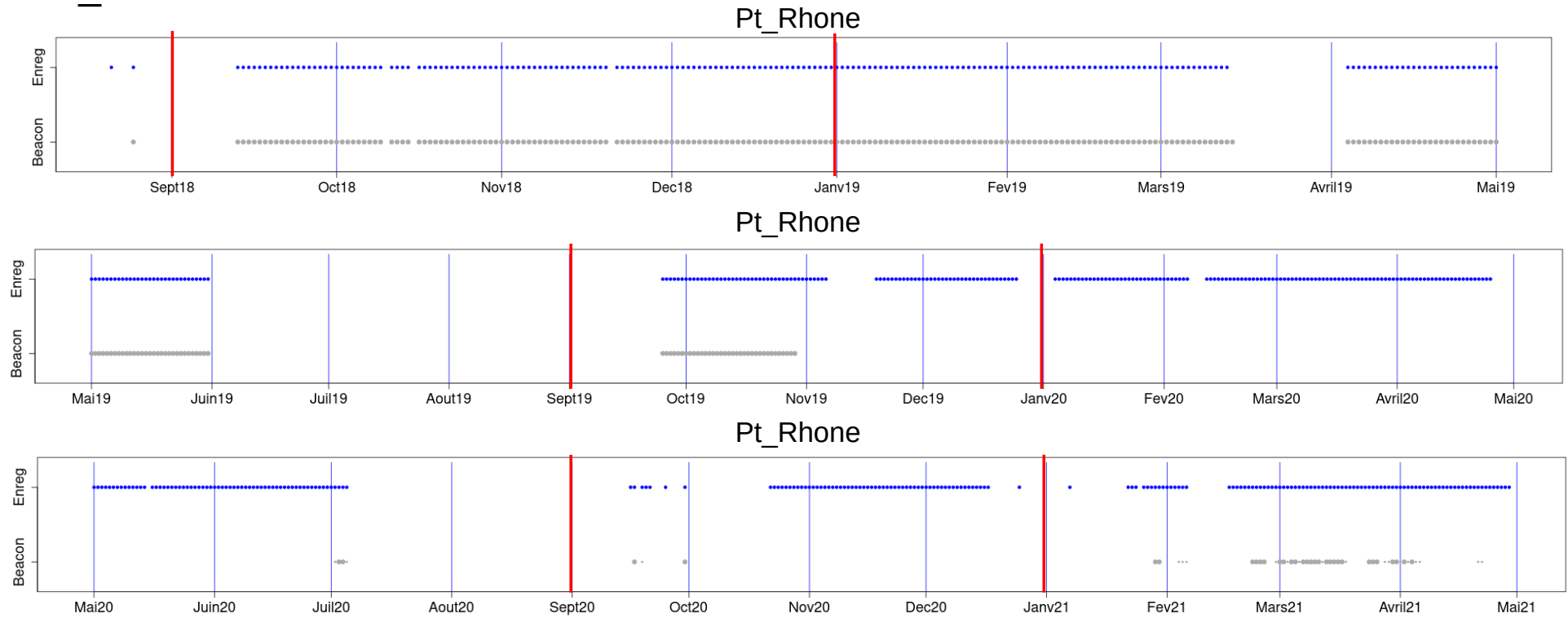


Arles_RG



Arles_Petit_Rhône

Pt_Rhone



8- Données brutes de passage aux portes de détection

- les détections des anguilles marquées en 2018, 2019 et 2020 (année)

Nous donnons ici pour chaque anguille marquées ses références et le jour et l'heure de détection pour chaque détecteur (les portes de détection ont un ou deux détecteurs)

H_Marq = heure de marquages

ID_HTI = période_subcode

Stade = stade Durif déterminé sur le terrain

Length = longueur totale en mm

Weight = masse en grammes

Site = secteur de capture de l'anguille (amont, zone de marquage, Sud)

Sont données la Date et l'heure de la première détection d'une anguille pour chaque détecteurs qui l'a entendue

Les portes de détection :

Ecl = Ecluse, Us = Aval Usine, Vr = RCC, Pk = Pk220, Ar = Arles Grand Rhône et PtR = Petit Rhône

D =rive Droite ; G = rive Gauche

_D = Date en AAAAMMJJ et _H = Heure en HH:MM

Passage = route que nous attribuons à l'anguille en fonction de ses détections

113	20190828	14:30:00	3544_02	798	980	FIII	Marquage		20190906 04:06	20190912 06:11	RCC				
114	20190828	15:00:00	3592_13	683	570	FIII	Marquage								
115	20190828	15:30:00	3211_11	820	1175	FIV	Marquage	20191102 21:53	20191114 06:26	20191114 05:54	20191111 21:12	RCC			
116	20190828	15:45:00	3196_31	662	585	FIII	Marquage	20191020 09:27		20191021 19:06	20191021 19:07	20191022 19:36	20191022 19:35	Usine	
117	20190828	16:00:00	3265_07	717	655	FIII	Marquage								
118	20190828	16:15:00	3253_25	849	1145	FIII	Marquage								
119	20190828	16:30:00	3013_29	698	760	FIII	Marquage								
120	20190828	16:45:00	3397_17	644	530	FIII	Marquage		20191123 17:51					Usine	
121	20190828	17:00:00	3295_11	636	575	FIII	Marquage								
122	20190829	14:20:00	3307_01	751	680	FIII	Marquage								
123	20190829	14:30:00	3136_11	644	605	FIII	Marquage								
124	20190829	14:45:00	3364_17	694	610	FIII	Marquage								
125	20190829	14:55:00	3088_15	702	575	FIII	Marquage								
126	20190829	15:10:00	3190_27	777	1025	FIII	Marquage	20191030 11:59	20191106 09:55	20191110 16:17	20191110 16:11			Usine	
127	20190829	15:20:00	3064_25	794	840	FIII	Marquage			20191025 19:21	20191025 19:45	20191025 19:48		RCC	
128	20190829	15:30:00	3328_25	675	595	FIII	Marquage								
129	20190829	15:45:00	3175_01	639	625	FIII	Marquage	20191025 19:15		20191025 19:48	20191025 19:44	20191026 11:18		Usine	
130	20190902	17:00:00	3046_31	680	575	FIII	Amont								
131	20190902	17:20:00	3001_31	743	700	FIII	Amont								
132	20190902	17:40:00	3118_11	694	645	FIII	Amont								
133	20190903	11:35:00	3088_17	720	620	FIII	Marquage								
134	20190903	11:45:00	3136_01	708	740	FIII	Marquage								
135	20190903	11:58:00	3364_27	700	710	FIII	Marquage		20191123 18:41	20191123 18:52				Usine	
136	20190903	12:20:00	3175_25	768	770	FIII	Marquage		20190904 07:34	20190904 07:35	20190904 08:19	20190904 08:42	20190904 18:17	20190904 18:44	Usine
137	20190903	12:35:00	3190_02	698	635	FIII	Marquage								
138	20190903	14:30:00	3397_25	711	610	FIII	Marquage								
139	20190903	14:45:00	3592_19	706	660	FIII	Amont								
140	20190903	15:00:00	3328_17	770	850	FIII	Amont								
141	20190903	16:00:00	3307_11	658	655	FIII	Amont								
142	20190903	16:30:00	3565_31	715	765	FIII	Amont		20191021 20:17	20191021 20:34	20191021 20:34	20191022 12:44		Usine	
143	20190903	17:50:00	3295_13	704	760	FV	Amont								
144	20190903	18:00:00	3118_25	722	620	FIII	Amont								
145	20190904	09:30:00	3064_13	743	740	FV	Amont								
146	20190904	09:45:00	3265_19	708	620	FIII	Amont								
147	20190904	10:00:00	3544_13	778	950	FIV	Amont	20191025 11:48		20191025 12:32		20191026 03:07		Usine	
148	20190904	10:30:00	3046_17	905	1500	FIV	Amont								
149	20190904	10:40:00	3529_13	728	740	FIII	Amont								
150	20190904	10:50:00	3445_07	658	575	FIII	Amont	20200626 22:39	20200626 23:01	20200626 23:29	20200626 23:22			Usine	

151	20190904	11:00:00	3253_13	710	570	FIII	Amont													
152	20190904	11:15:00	3412_31	775	915	FIII	Amont													
153	20190904	11:30:00	3013_01	714	585	FIII	Amont			20191024 21:14		20191024 21:28	20191026 09:36						RCC	
154	20190904	15:00:00	3196_29	707	620	FIII	Amont	20200509 01:56	20200509 02:18	20200509 02:18		20200509 02:42	20200509 02:42	20200510 10:58					Usine	
155	20190904	15:15:00	3211_17	790	1045	FIV	Amont	20191001 15:42	20191003 02:49	20191003 02:49		20191003 03:31	20191003 03:30						Usine	
156	20191106	13:30:00	3592_07	413	145	MD	Sud													
157	20191106	13:45:00	3253_17	452	175	MD	Sud													
158	20191106	14:00:00	3013_19	745	970	FIV	Sud													
159	20191106	14:10:00	3544_01	645	480	FIV	Sud													
160	20191106	14:20:00	3565_02	426	150	MD	Sud													
161	20191106	14:30:00	3175_13	430	150	MD	Sud													
162	20191106	14:47:00	3295_31	830	1265	FIV	Sud													
163	20191106	15:00:00	3046_19	773	1095	FIII	Sud	20191106 21:04		20191106 21:29		20191106 21:44	20191106 21:43						Usine	
164	20191106	15:10:00	3211_15	690	655	FIII	Sud	20191115 08:45				20191115 09:46								Usine
165	20191106	15:15:00	3175_19	780	1050	FIV	Sud			20191106 22:09			20191106 22:26	20191106 22:25						Usine
166	20191106	15:25:00	3190_19	432	195	MD	Sud					20191114 01:14	20191111 03:28						RCC	
167	20191106	15:32:00	3001_29	440	145	MD	Sud													
168	20191106	15:40:00	3136_15	586	510	FV	Sud	20191106 20:24		20191106 20:43		20191106 21:01	20191106 21:01							Usine
169	20191106	15:47:00	3196_17	417	145	MD	Sud													
170	20191106	16:01:00	3046_27	712	785	FV	Sud	20191106 22:23		20191106 22:45		20191106 23:01	20191106 23:01							Usine
171	20191106	16:30:00	3328_15	716	860	FIV	Sud	20191107 00:27		20191107 00:52		20191107 01:08								Usine
172	20191106	16:44:00	3253_07	730	675	FV	Sud					20191106 22:53	20191106 22:53	20191106 23:14	20191106 23:14					RCC
173	20191106	16:54:00	3088_02	732	650	FV	Sud													
174	20191106	17:05:00	3118_27	435	155	MD	Sud													
175	20191106	17:20:00	3088_01	425	155	MD	Sud													
176	20200903	16:22:00	3006_02	729	655	FIII	Amont													
177	20200826	17:20:00	3008_27	711	630	FIII	Amont													
178	20200903	16:15:00	3017_14	682	625	FII	Amont													
179	20200825	16:30:00	3018_27	716	615	FIII	Marquage													
180	20200903	16:40:00	3039_14	793	675	FIII	Amont													
181	20200831	12:00:00	3048_14	700	575	FIII	Marquage					20210511 01:51								NA
182	20200901	17:15:00	3060_06	731	765	FIII	Amont													
183	20200903	12:10:00	3061_12	727	630	FIII	Amont													
184	20200825	14:00:00	3069_05	642	590	FIII	Marquage													
185	20200827	15:45:00	3083_20	717	550	FIII	Amont													
186	20200903	12:00:00	3088_05	755	700	FII	Amont													
187	20200901	16:40:00	3089_08	726	785	FIII	Amont													
188	20200901	16:00:00	3119_03	802	1045	FIII	Amont	20200904 15:35	20200904 16:24	20200904 16:26		20200904 17:09	20200904 17:06							Usine

9- Données cartographiques des prospections mobiles

Ici, sont présentées les cartographies simplifiées (avec Pk) des positions du bateau utilisé pour les prospections mobiles (télémétrie active) de jour en amont et en aval de l'aménagement de Caderousse sur le Rhône. La position (XY) retenue est la position jugée la plus proche du bateau (analyse du signal détecté par les hydrophones embarqués de 30° d'ouverture).

Les prospections mobiles de l'amont sont groupées par type de comportement : Mobile vs Immobile. Les individus mobiles sont groupés par type de déplacement : Montée, Descente, Monté-descente, Descente-Montée et Descente-monté-descente

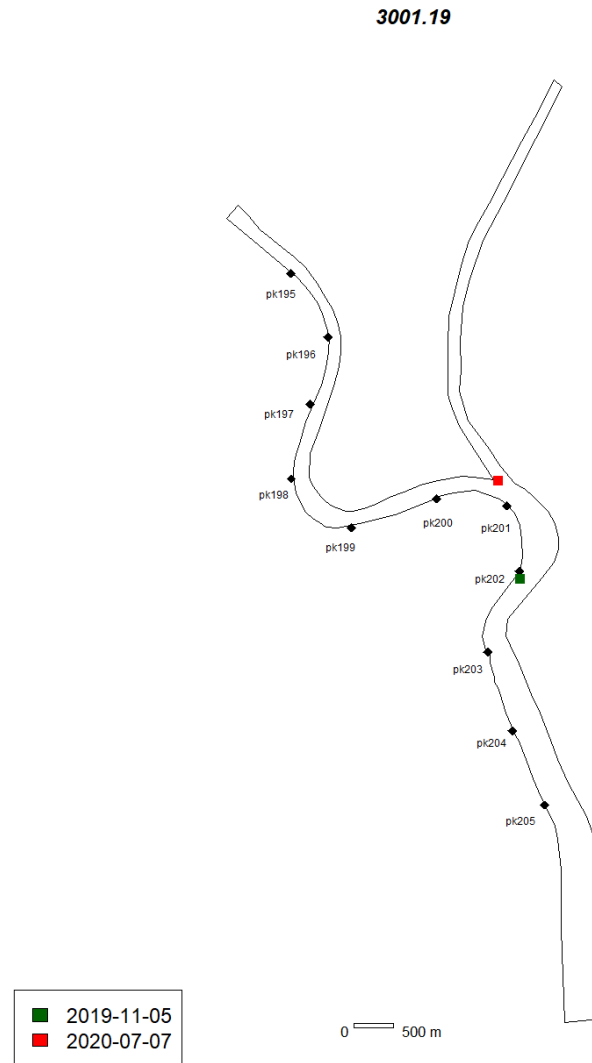
Prospection mobiles amont de jour : individus mobiles

Monté

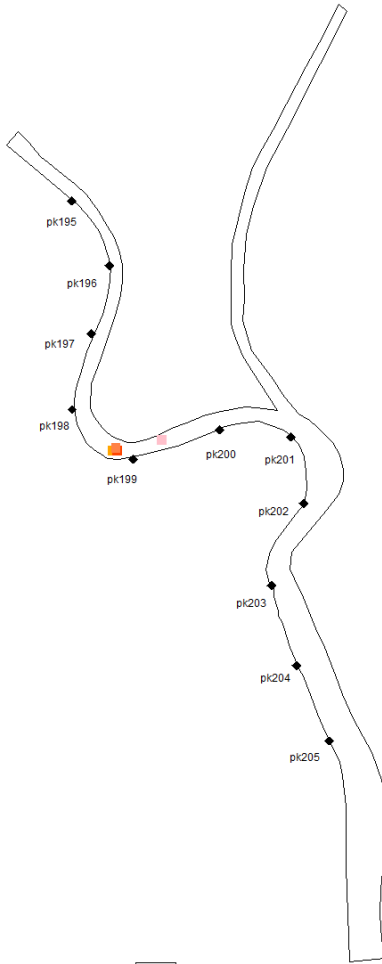
Prospections amont de jour

Individus mobiles

Monté

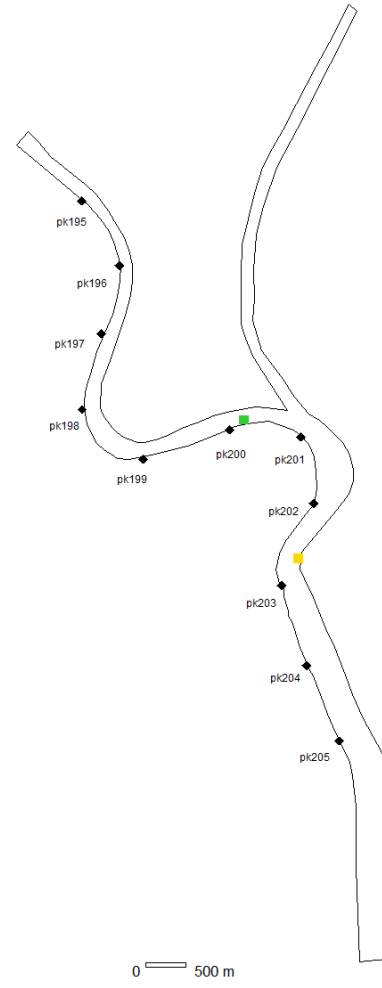


3046.31



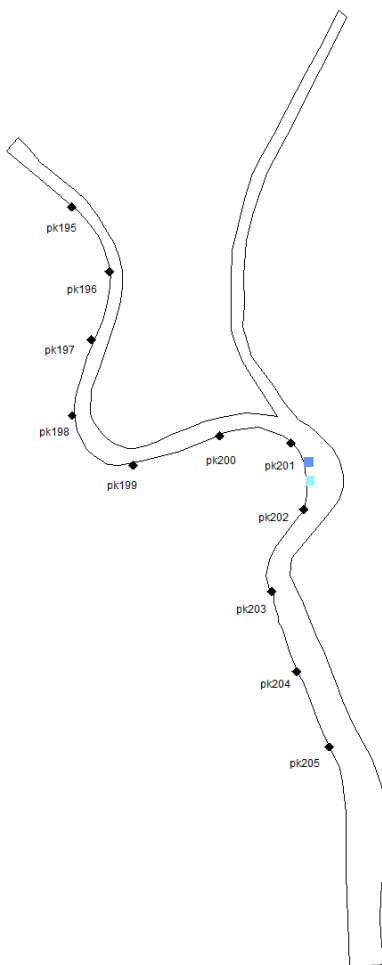
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10

3112.07



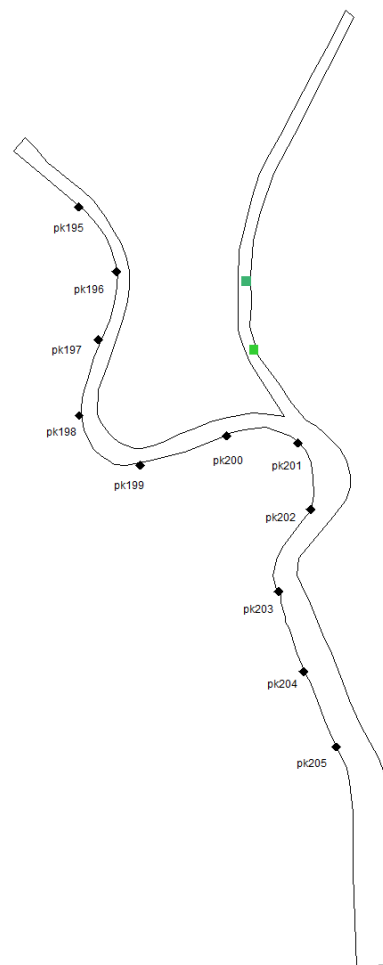
- 2018-11-28
- 2019-05-22

3115.31



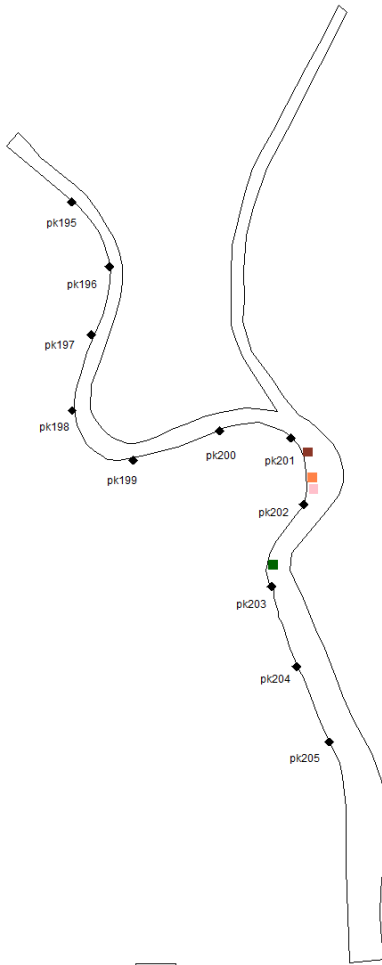
2021-03-11
2021-04-15

3223.13



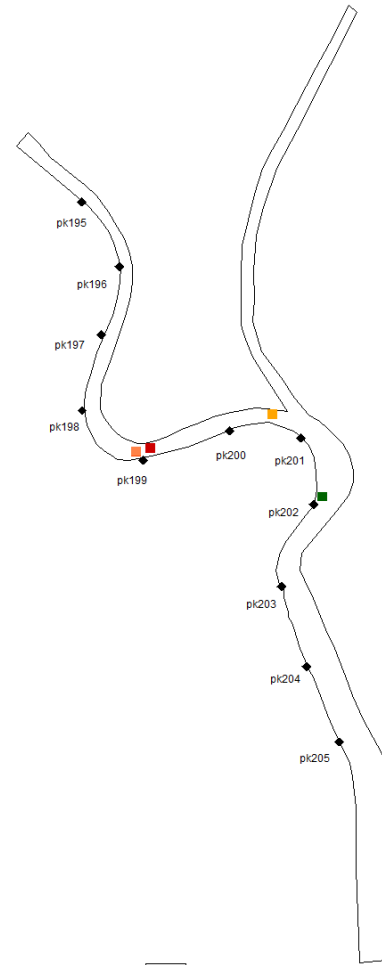
2019-05-22
2019-06-26

3259.07



- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-06-10
- 2020-11-26

3412.17



- 2019-11-05
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-08

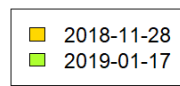
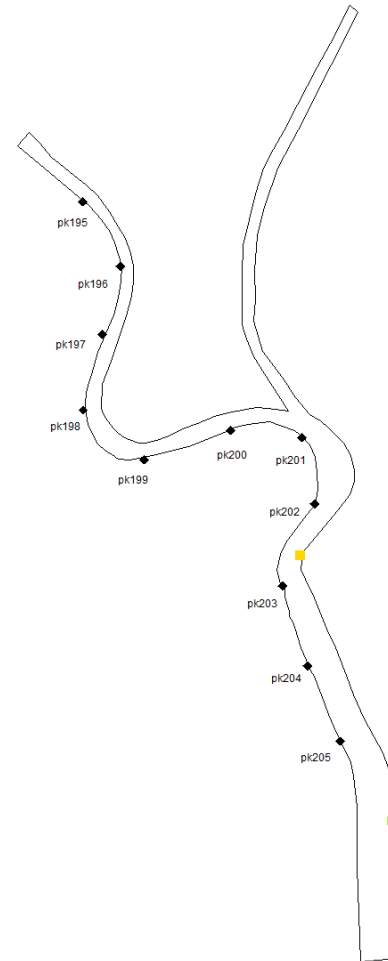
Descente

Prospections amont de jour

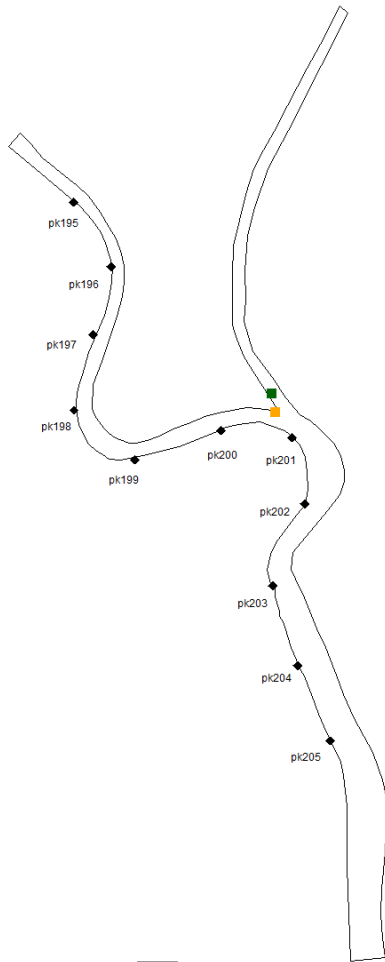
Individus mobiles

Descente

3004.25

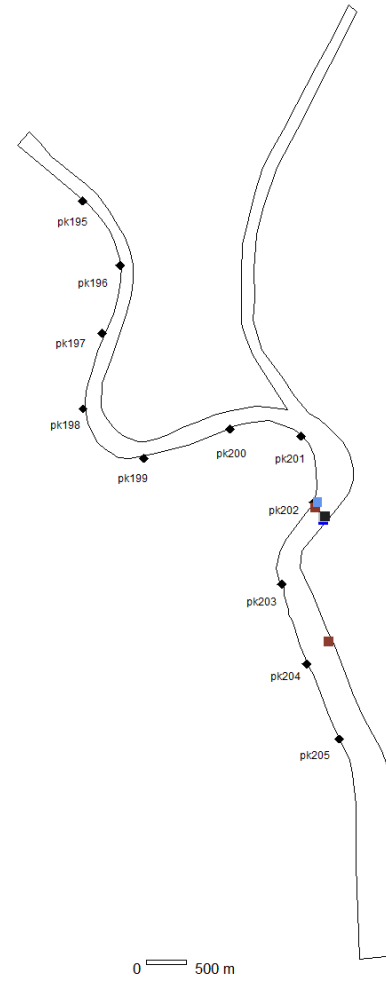


3196.19



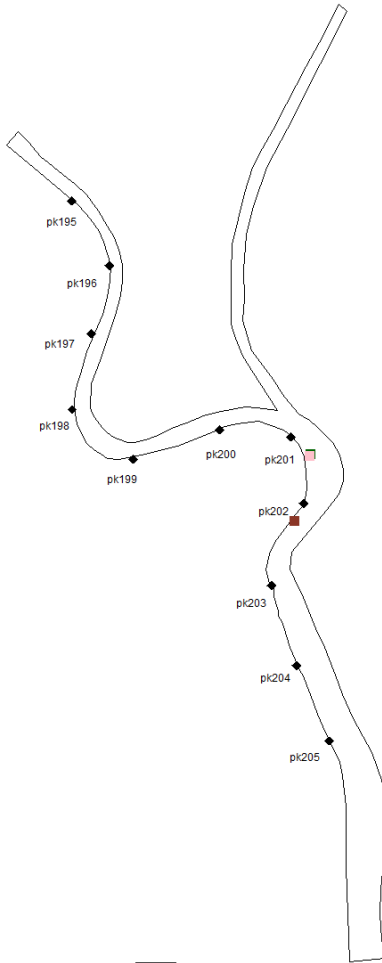
- 2019-11-05
- 2020-05-14

3296.15



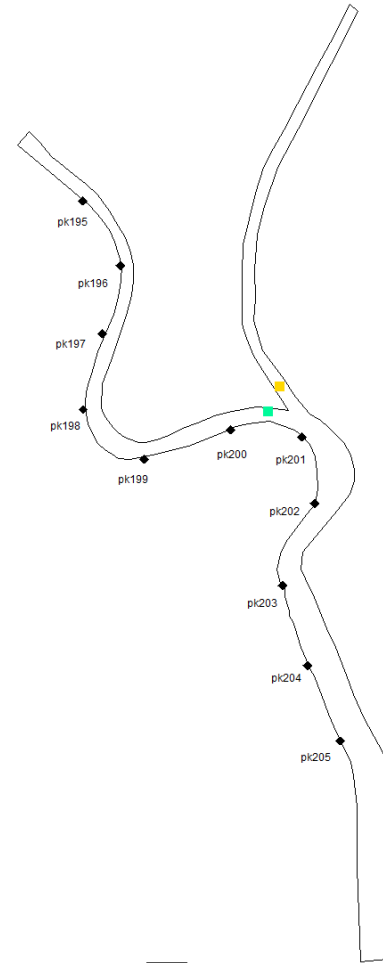
- 2020-11-26
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10
- 2021-07-07
- 2021-07-08
- 2022-03-30

3397.27



- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-11-26

3613.25



- 2018-11-28
- 2019-02-20

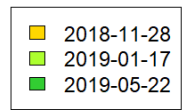
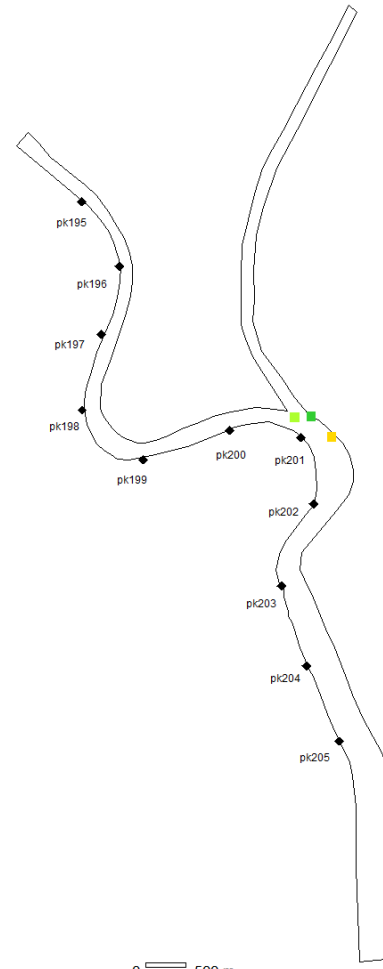
Monté - descente

Prospections amont de jour

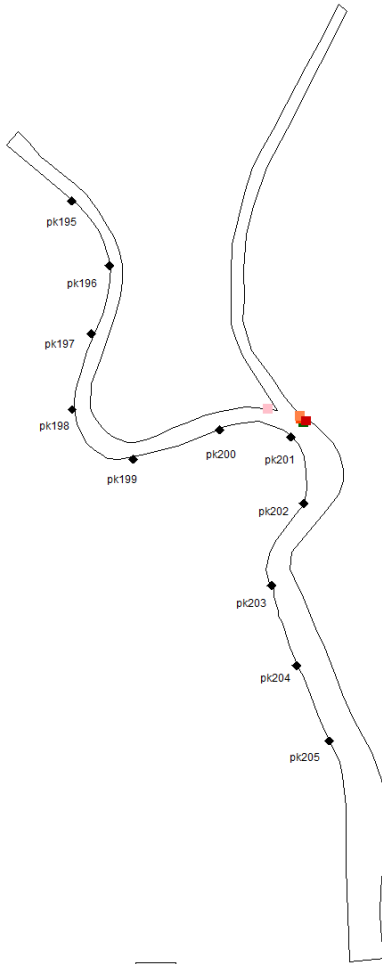
Individus mobiles

Monté - descente

3022.01

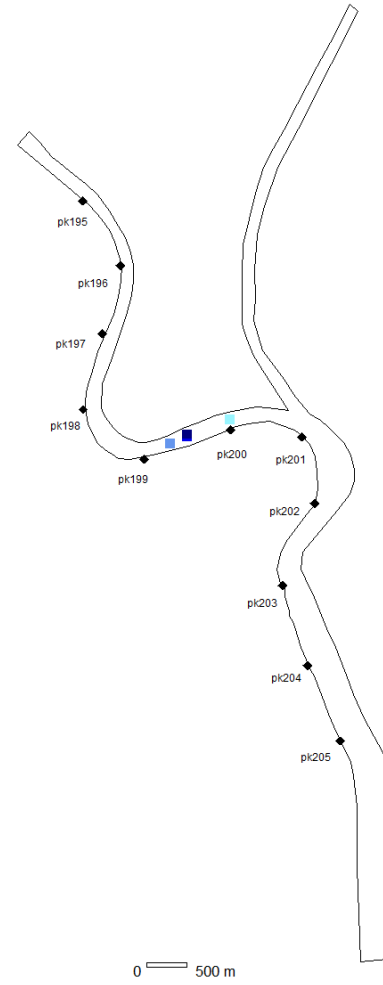


3118.11



- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-08

3122.21



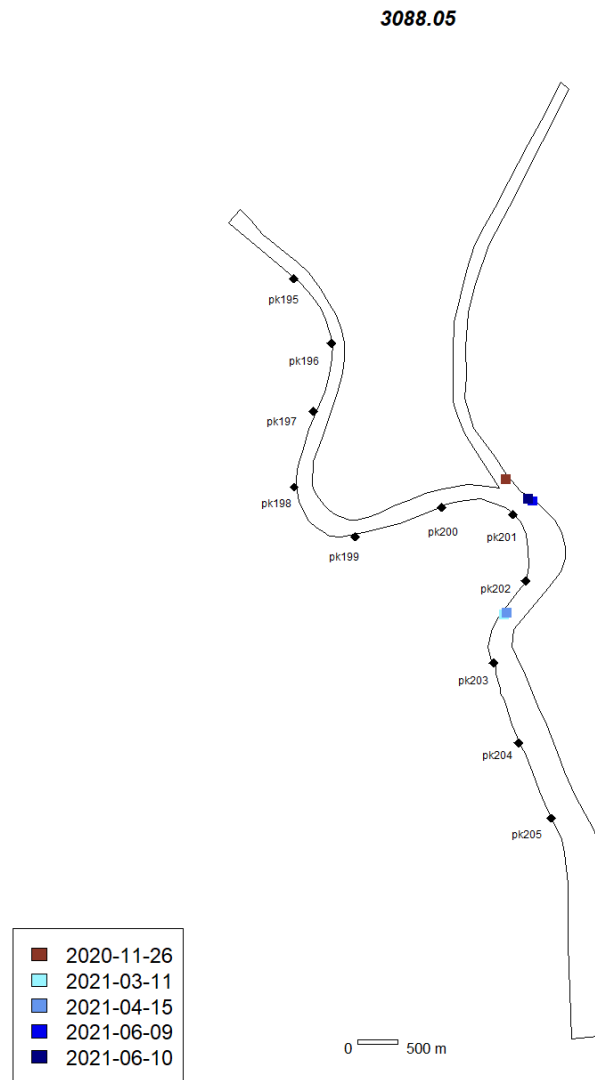
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10

Descente - monté

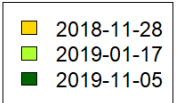
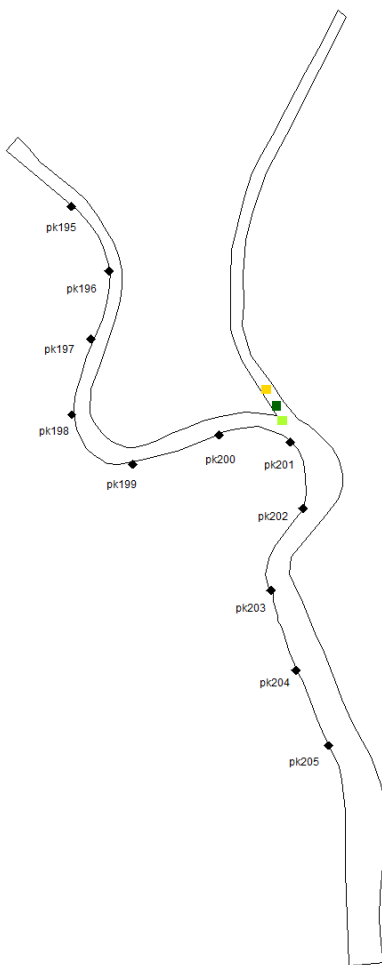
Prospections amont de jour

Individus mobiles

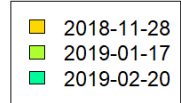
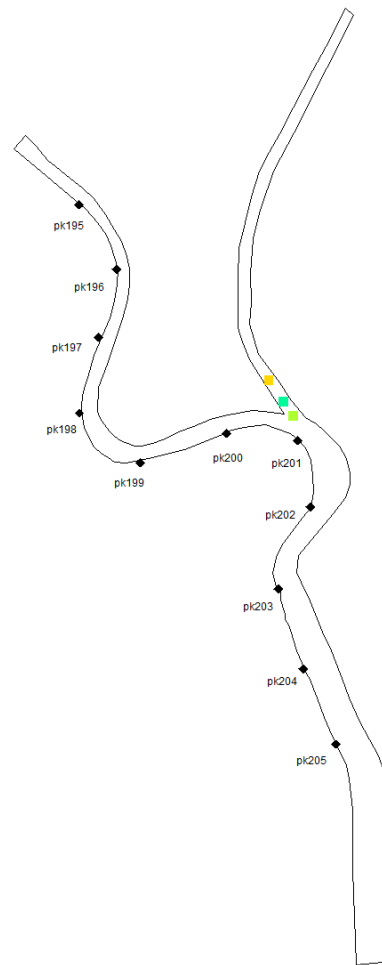
Descente - monté



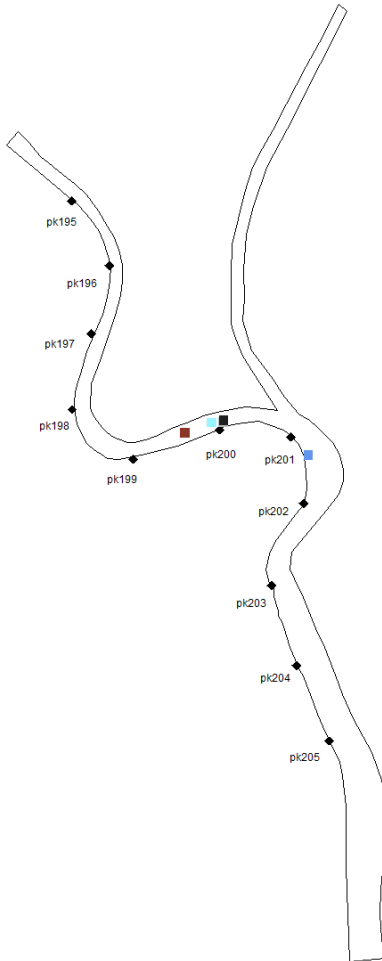
3280.07



3301.07

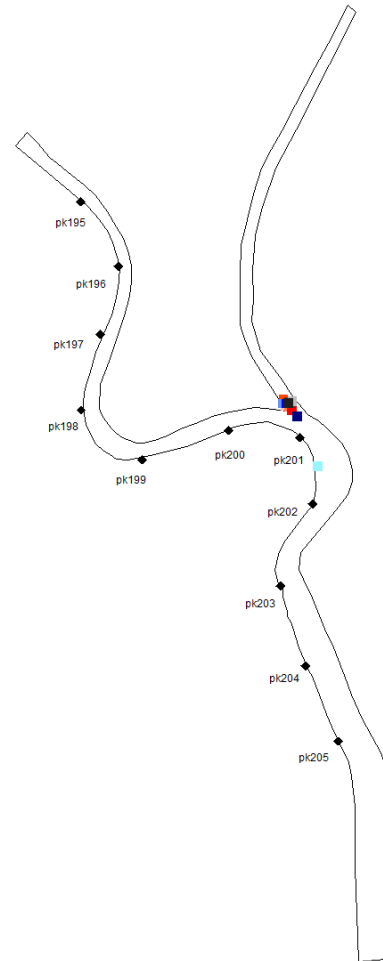


3365.06



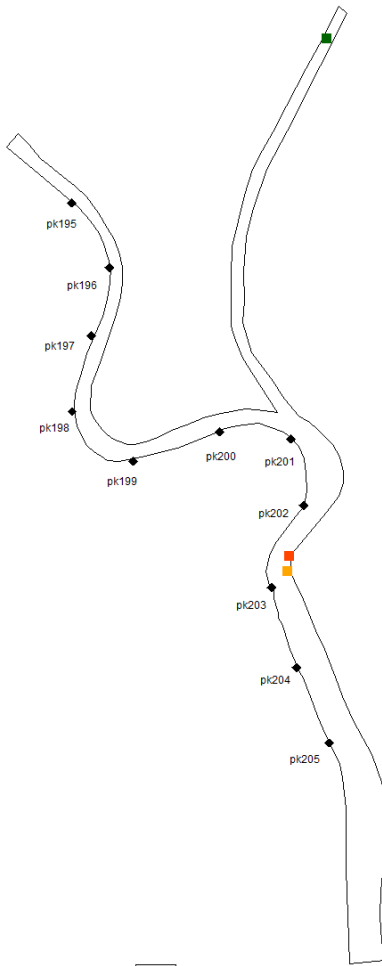
- 2020-11-26
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-07-07
- 2021-07-08

3397.25



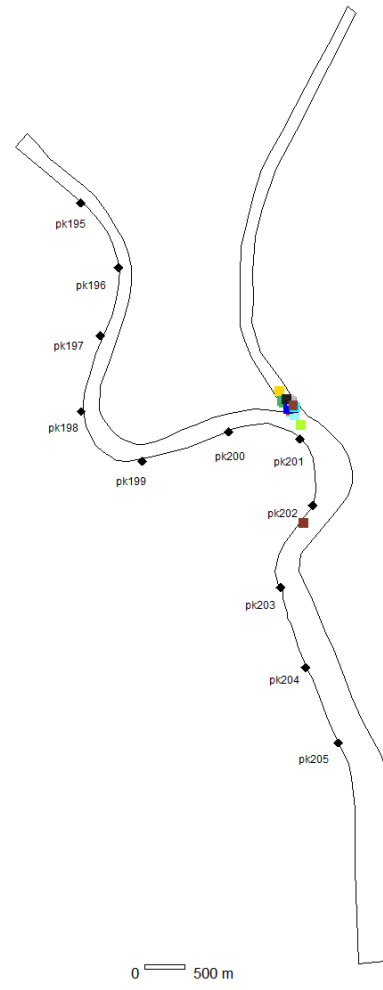
- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-07
- 2020-07-08
- 2020-11-26
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10
- 2021-07-07
- 2021-07-08

3445.07



- 2019-11-05
- 2020-05-14
- 2020-06-09

3523.19



- 2018-11-28
- 2019-01-17
- 2019-02-20
- 2019-05-22
- 2019-06-26
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-07
- 2020-07-08
- 2020-11-26
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10
- 2021-07-07
- 2021-07-08
- 2022-02-03
- 2022-03-30

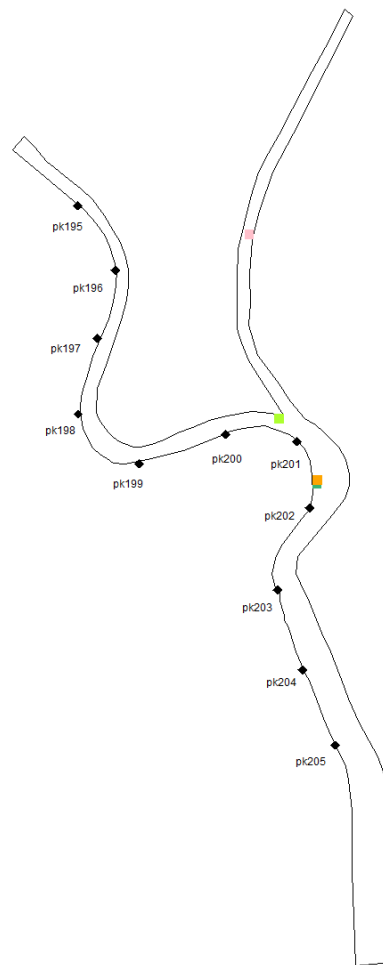
Descente – monté - descente

Prospections amont de jour

Individus mobiles

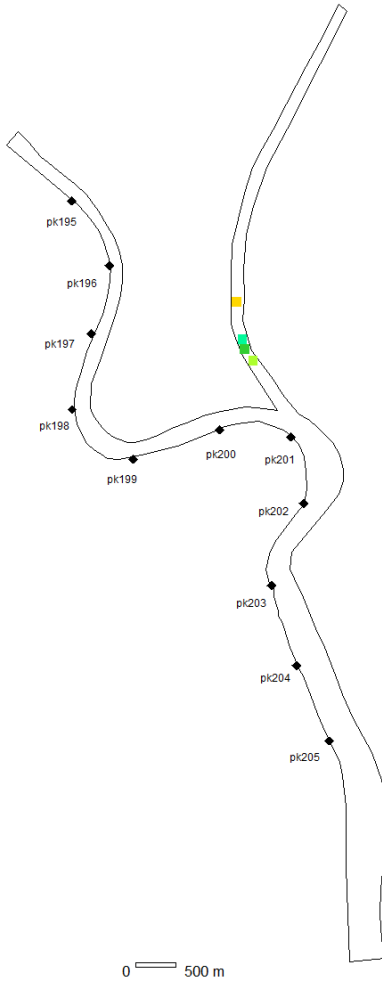
Descente – monté - descente

3043.01

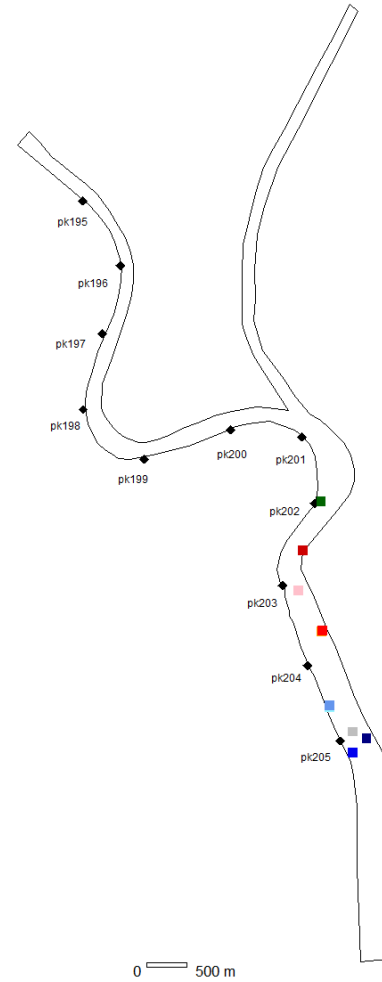


■	2019-01-17
■	2019-06-26
■	2020-01-16
■	2020-05-14

3244.13



3565.15



- 2018-11-28
- 2019-01-17
- 2019-02-20
- 2019-05-22

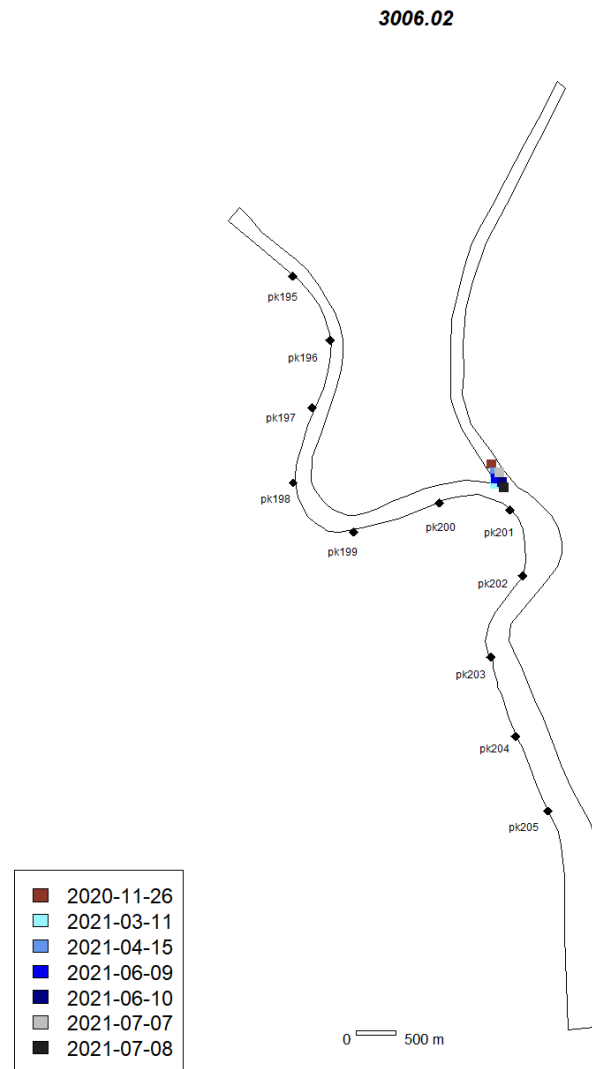
- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-07-07
- 2020-07-08
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10
- 2021-07-07

Prospection mobiles amont de jour : individus immobiles

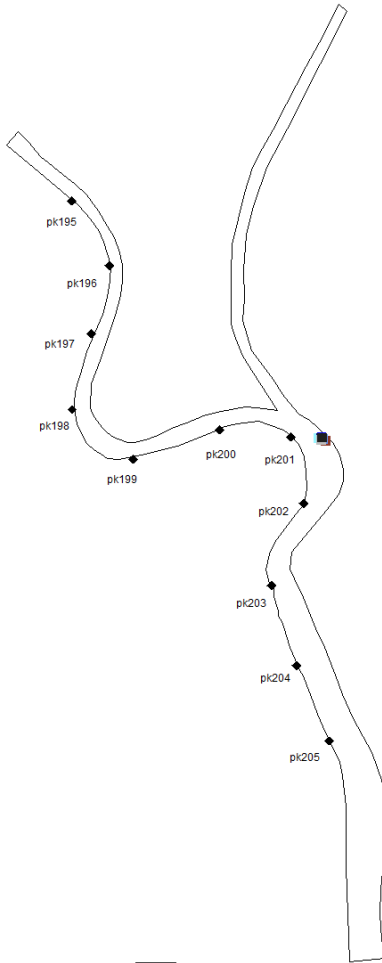
Prospections amont de jour

Individus immobiles

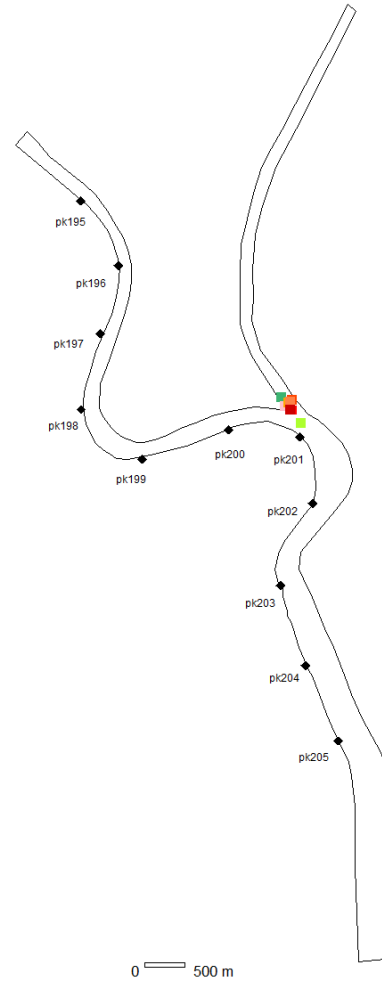
(13 exemples sur n=77 cartographies)



3017.14



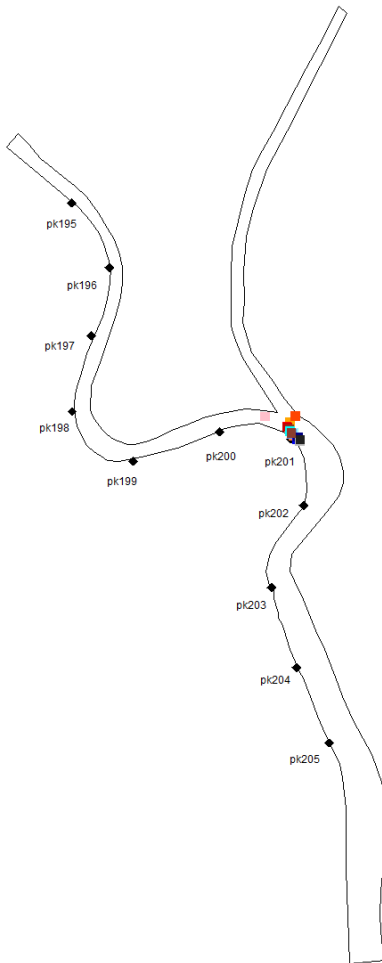
3055.13



- 2020-11-26
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10
- 2021-07-07
- 2021-07-08

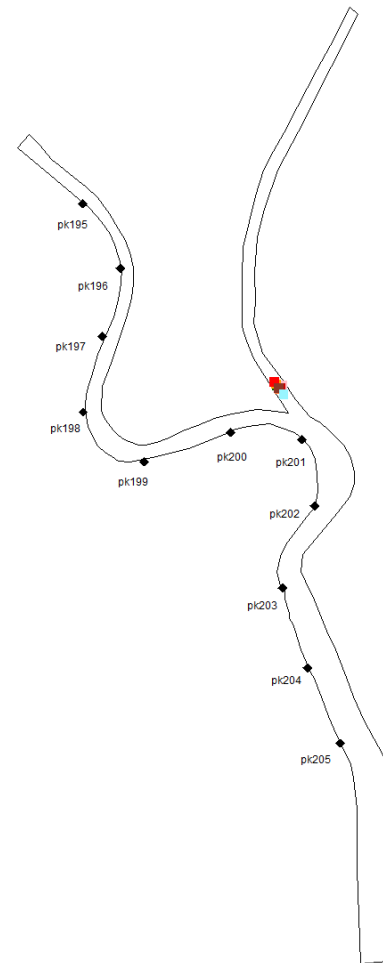
- 2018-11-28
- 2019-01-17
- 2019-02-20
- 2019-05-22
- 2019-06-26
- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-07
- 2020-07-08

3088.02



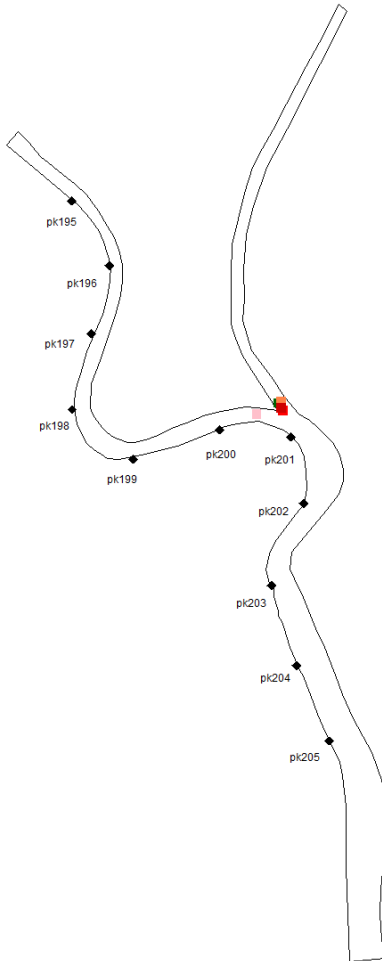
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-07
- 2020-07-08
- 2020-11-26
- 2021-03-11
- 2021-04-15
- 2021-06-09
- 2021-06-10
- 2021-07-07
- 2021-07-08
- 2022-02-03
- 2022-03-30

3088.15

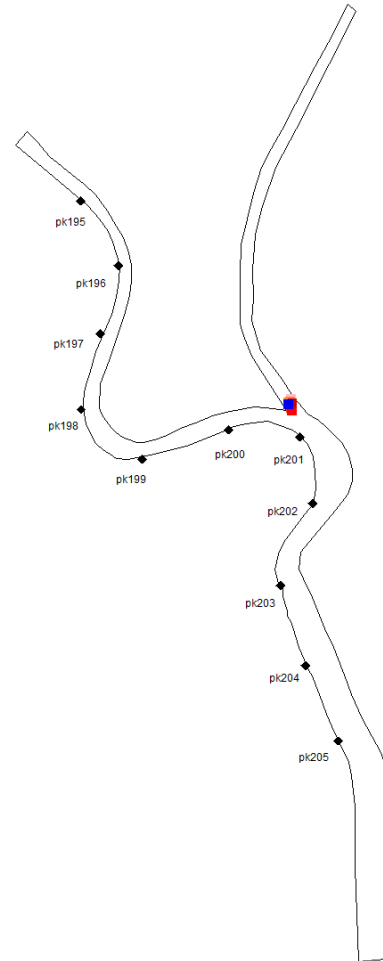


- 2019-11-05
- 2020-01-16
- 2020-05-14
- 2020-06-09
- 2020-06-10
- 2020-07-07
- 2020-07-08
- 2020-11-26
- 2021-03-11

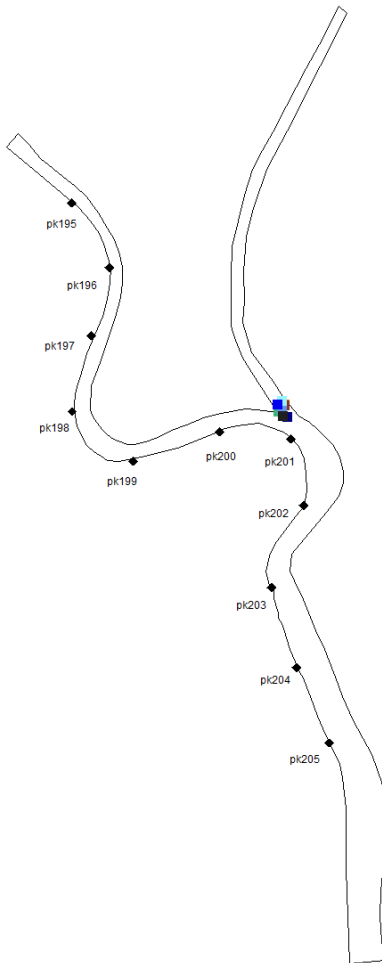
3136.11



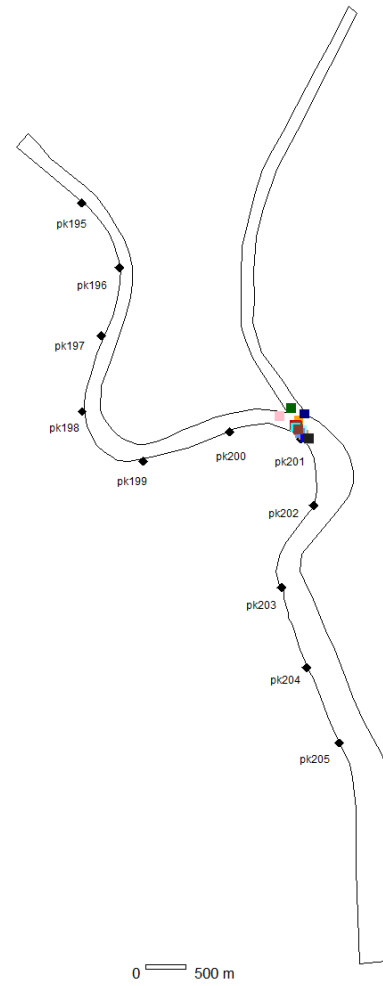
3136.29



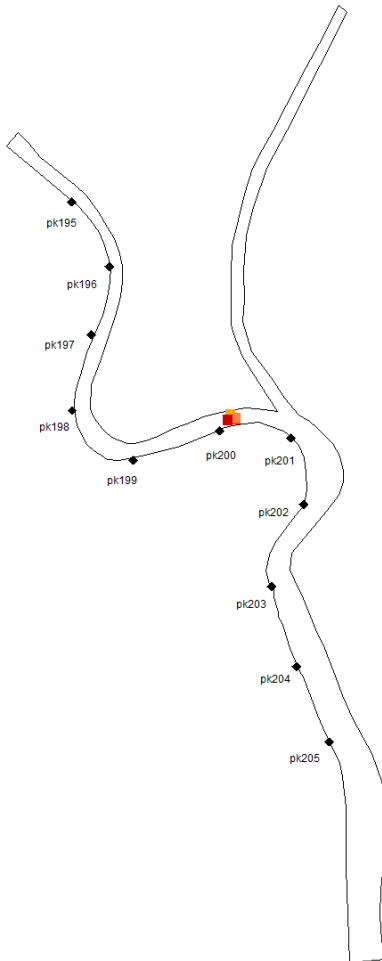
3199.31



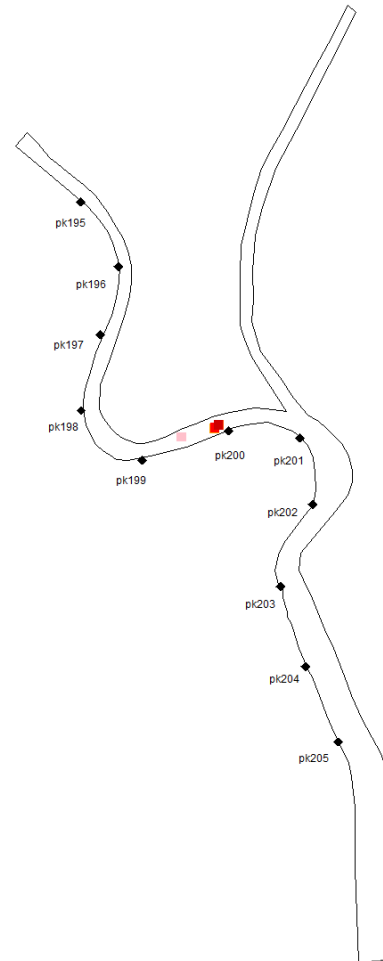
3253.25



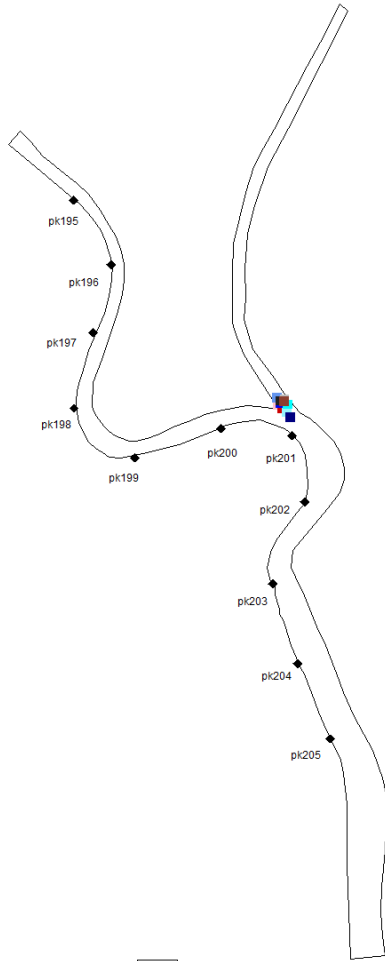
3307.01



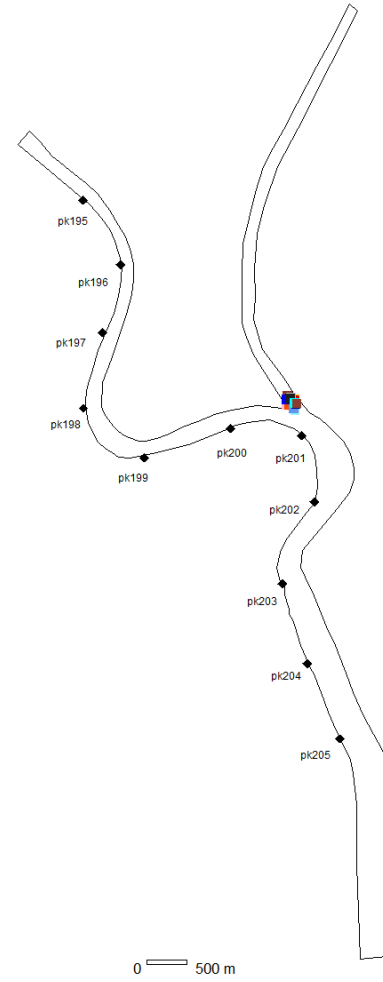
3328.17



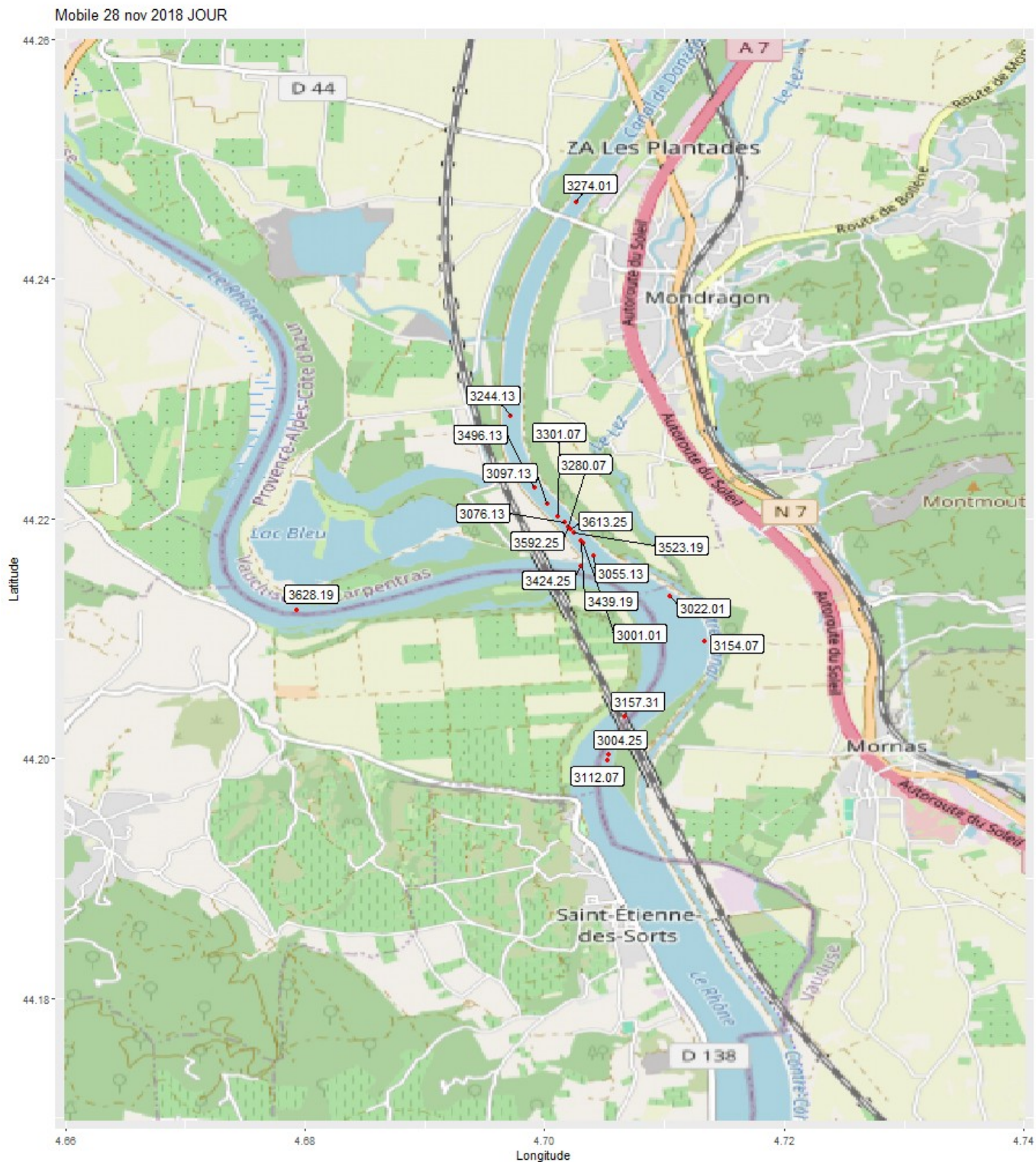
3529.07



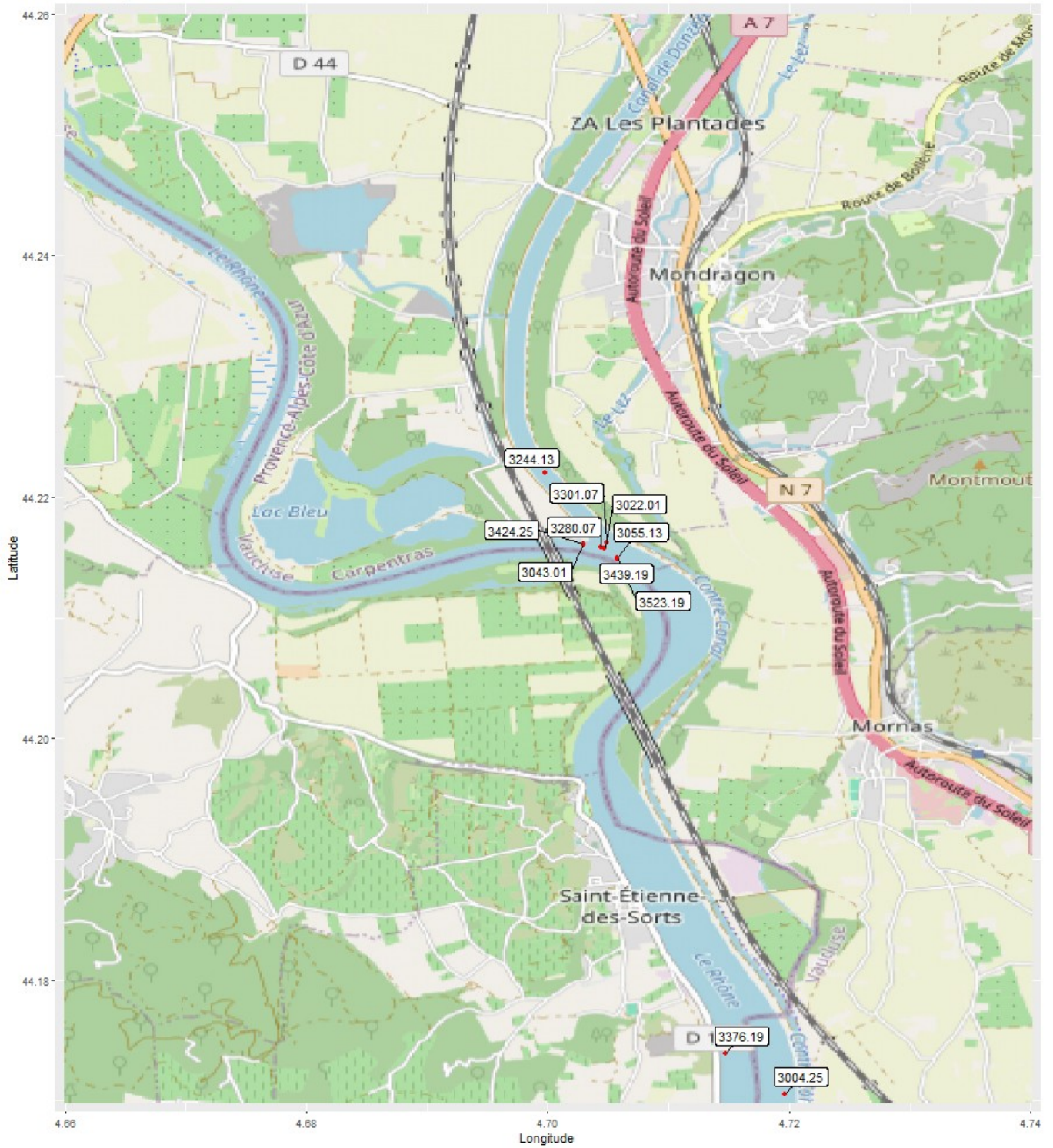
3592.19

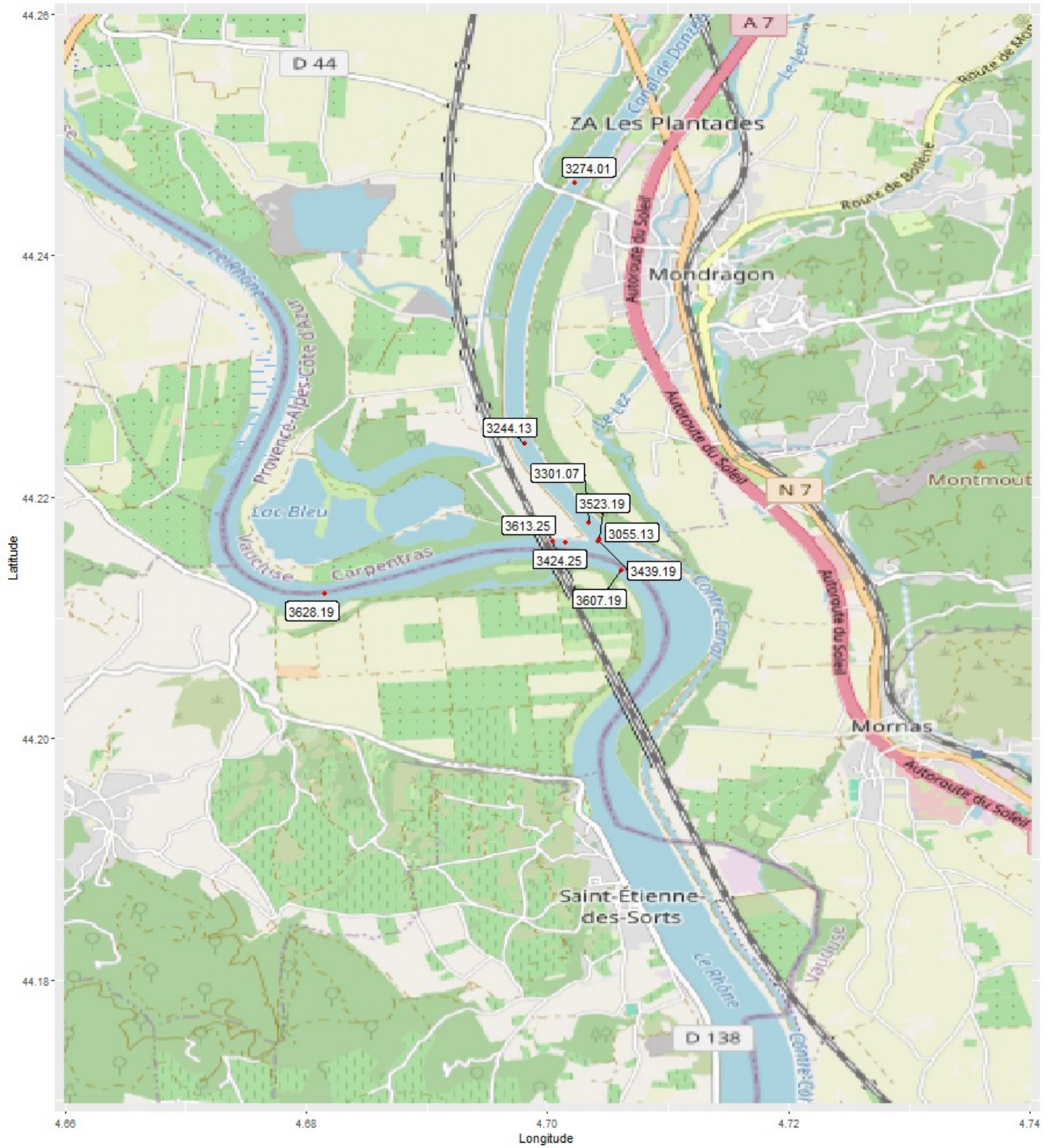


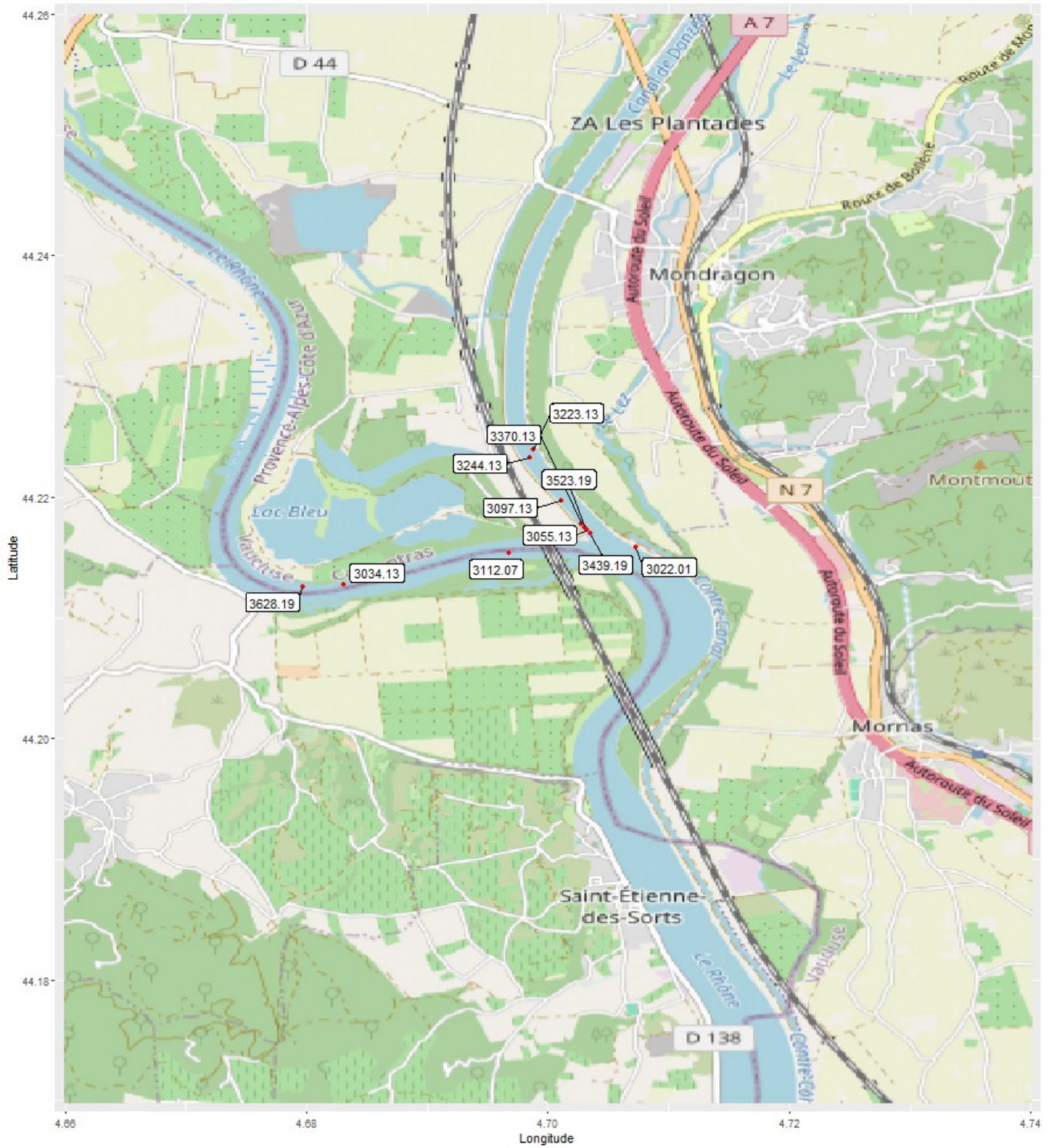
Prospection mobiles amont de jour – cartographies par prospection



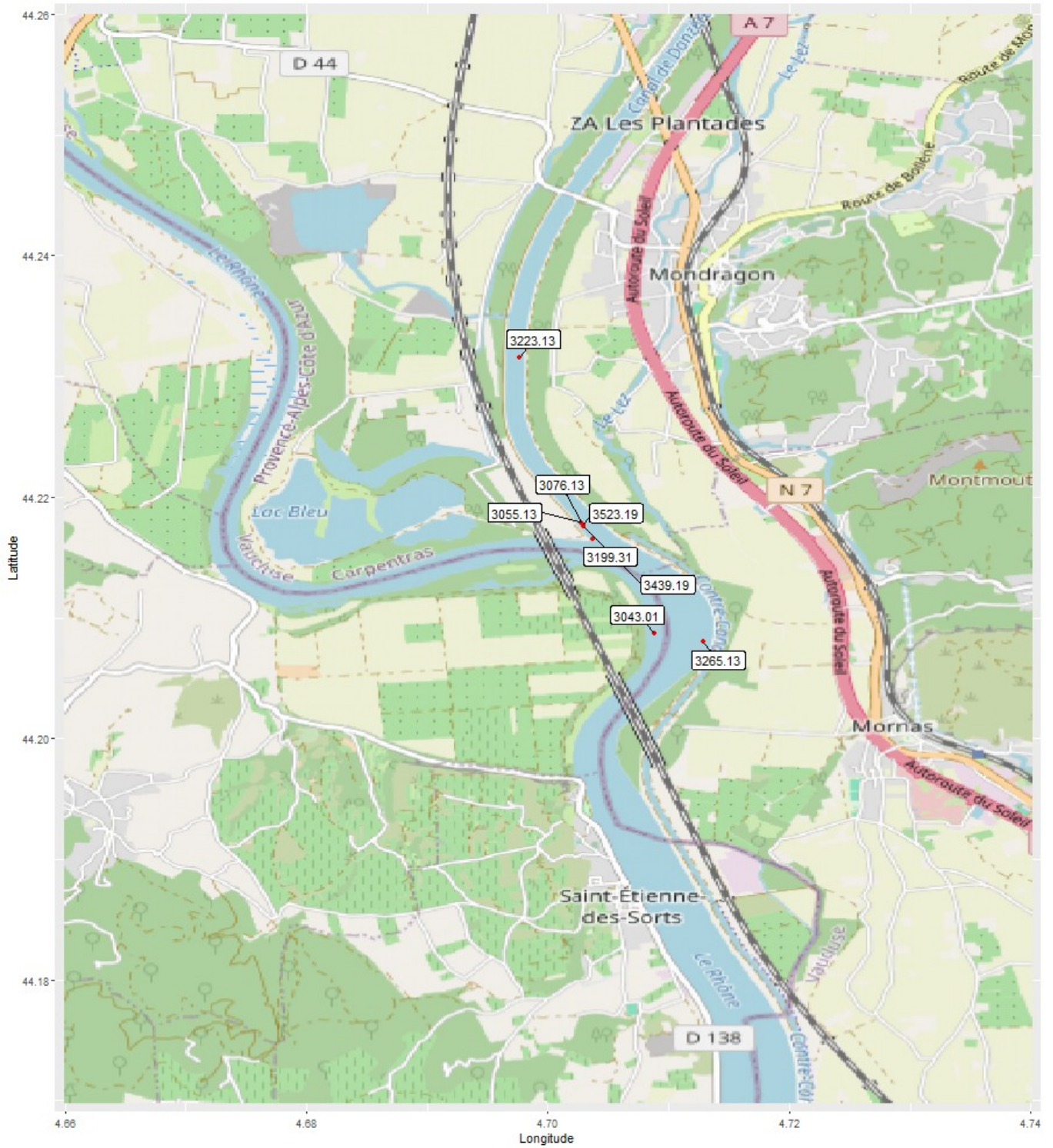
Mobile 17 janvier 2019 JOUR



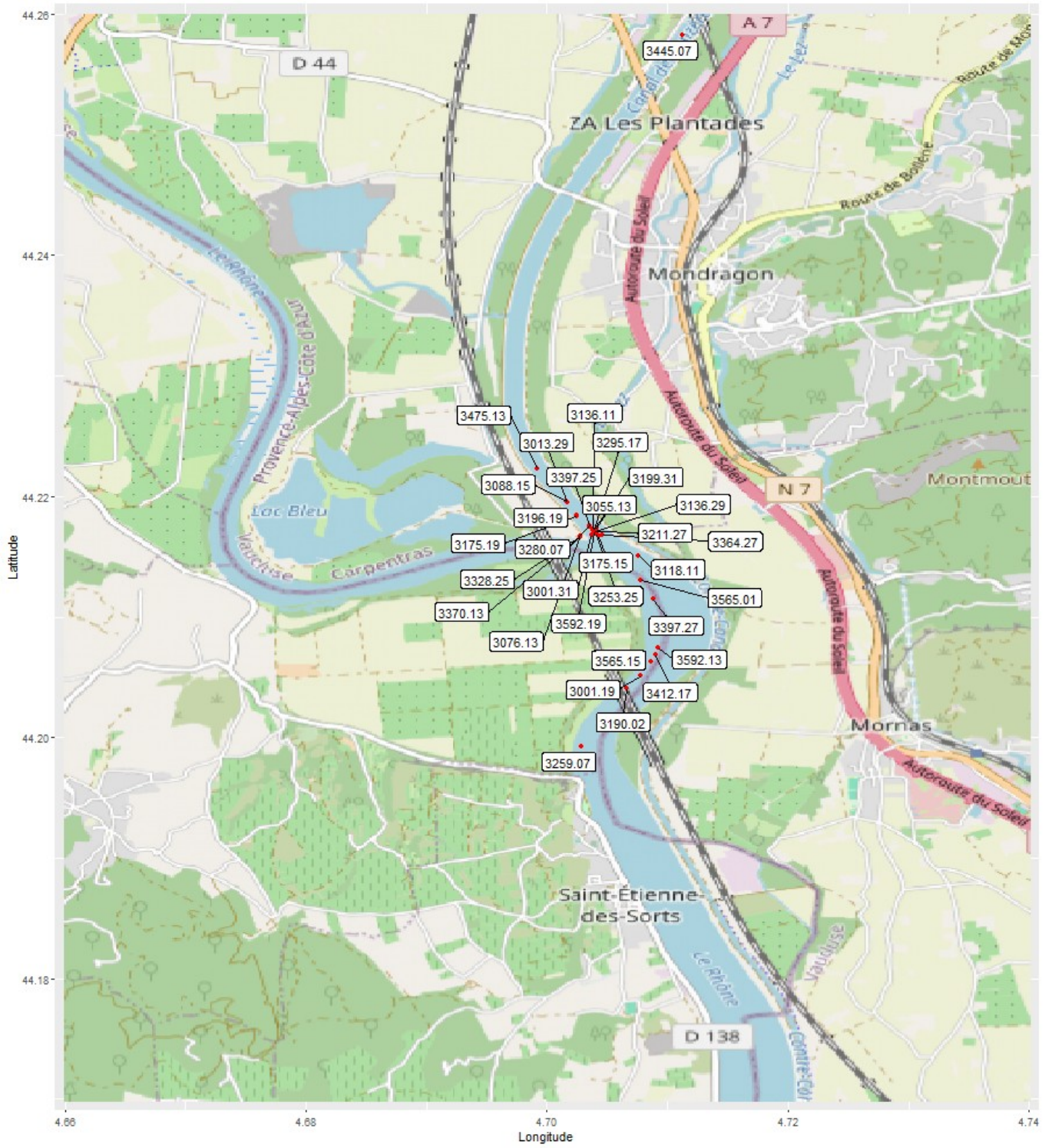


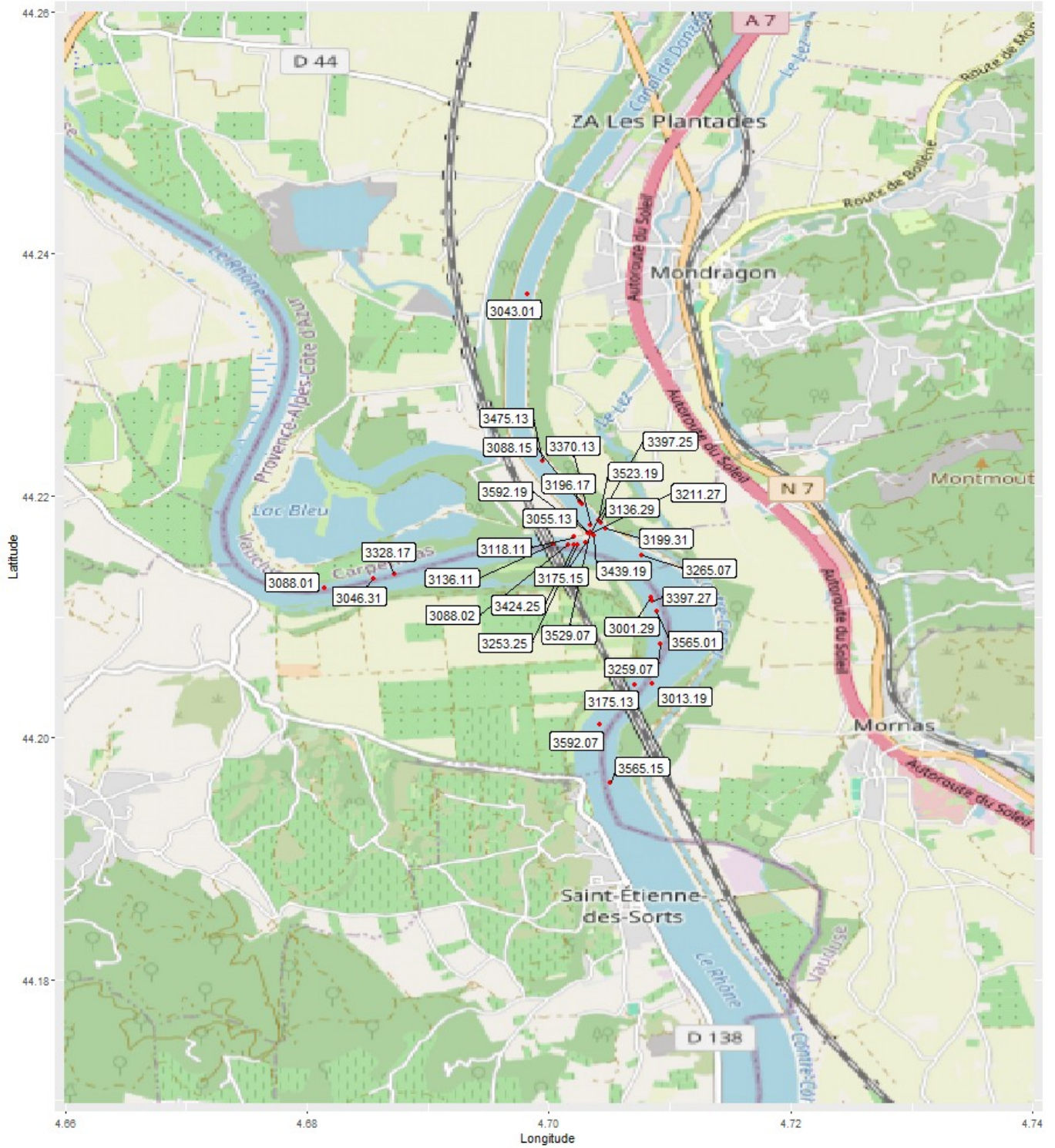


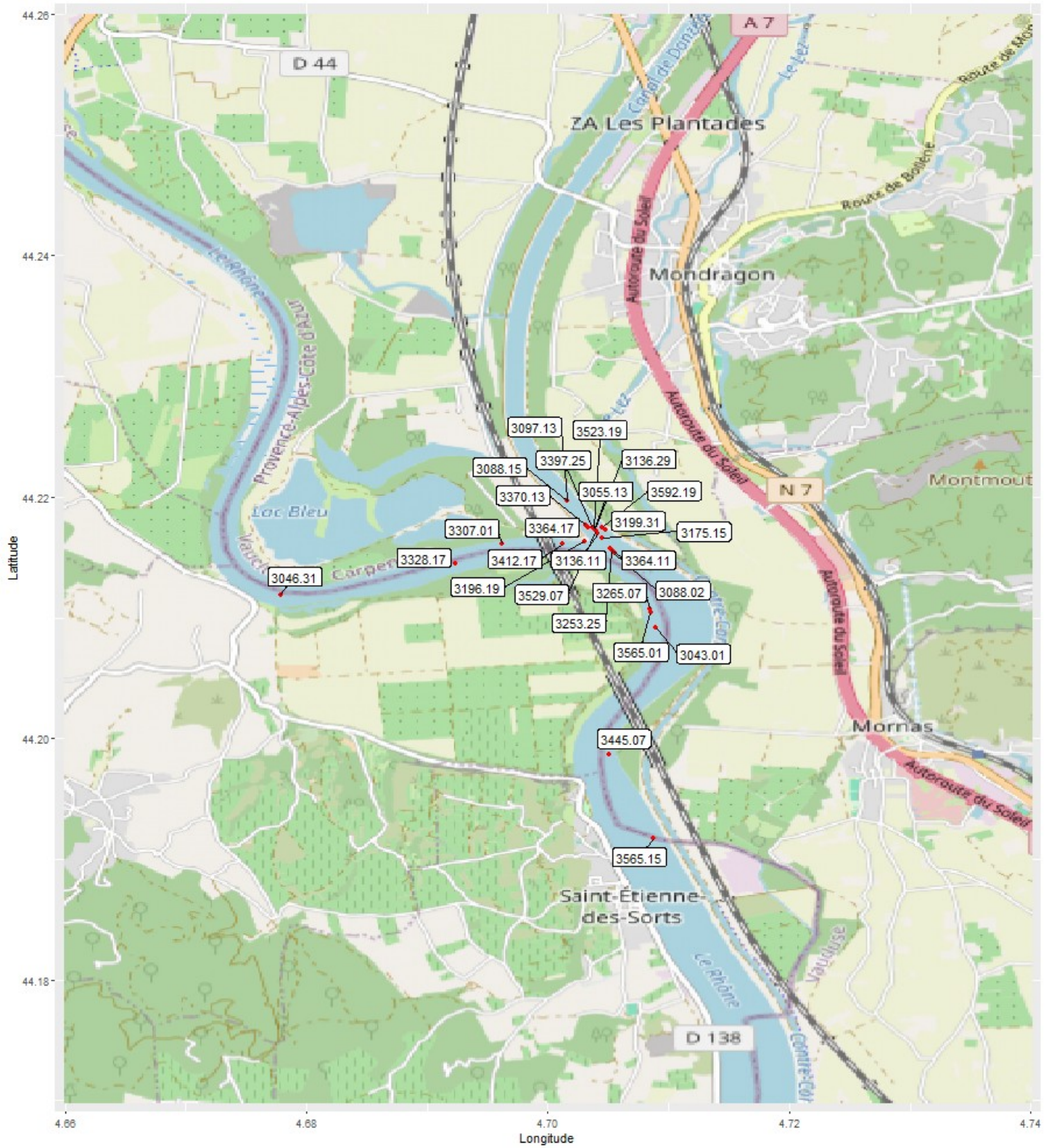
Mobile 26 juin 2019 JOUR



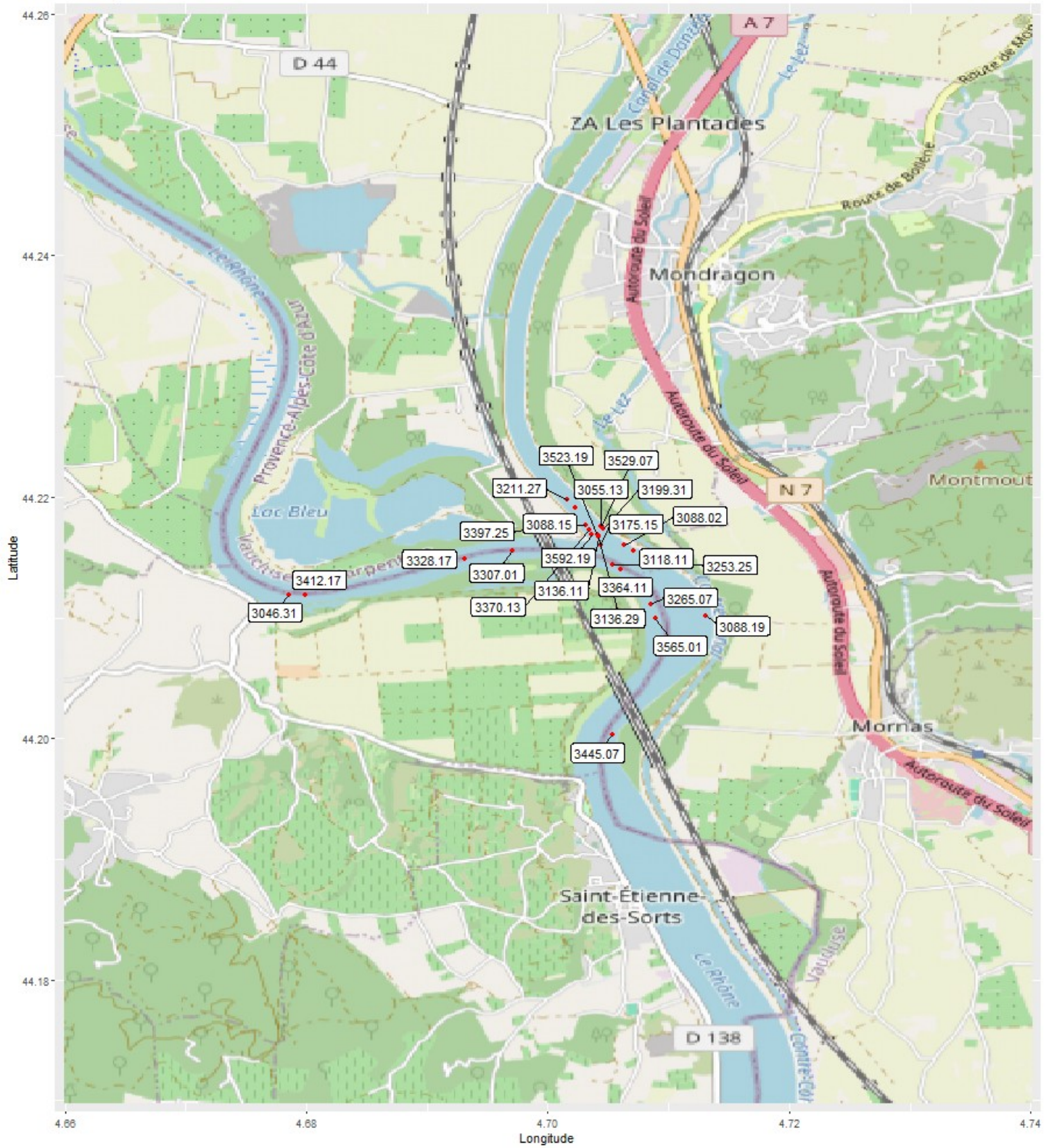
Mobile 5 nov 2019 JOUR



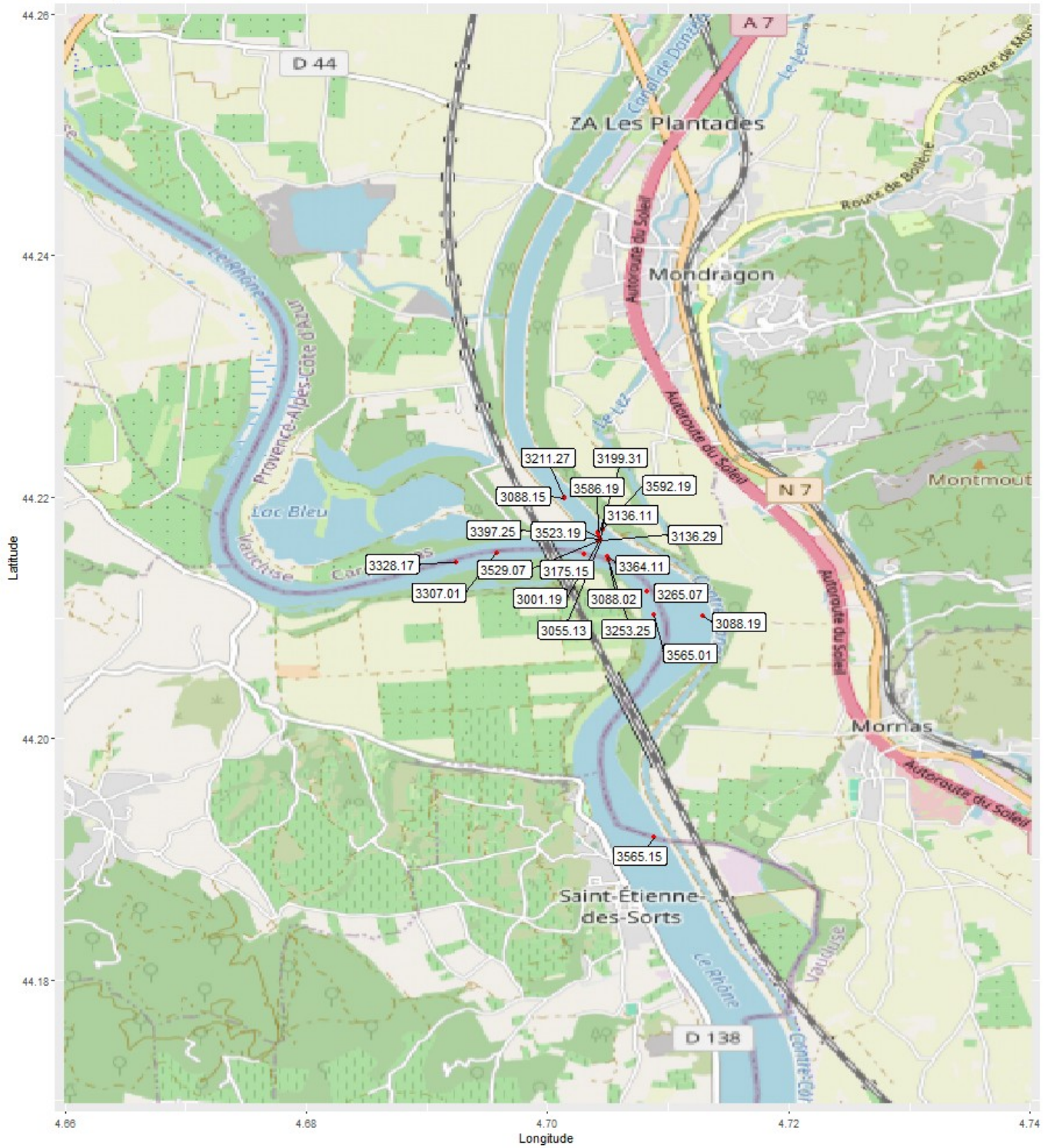


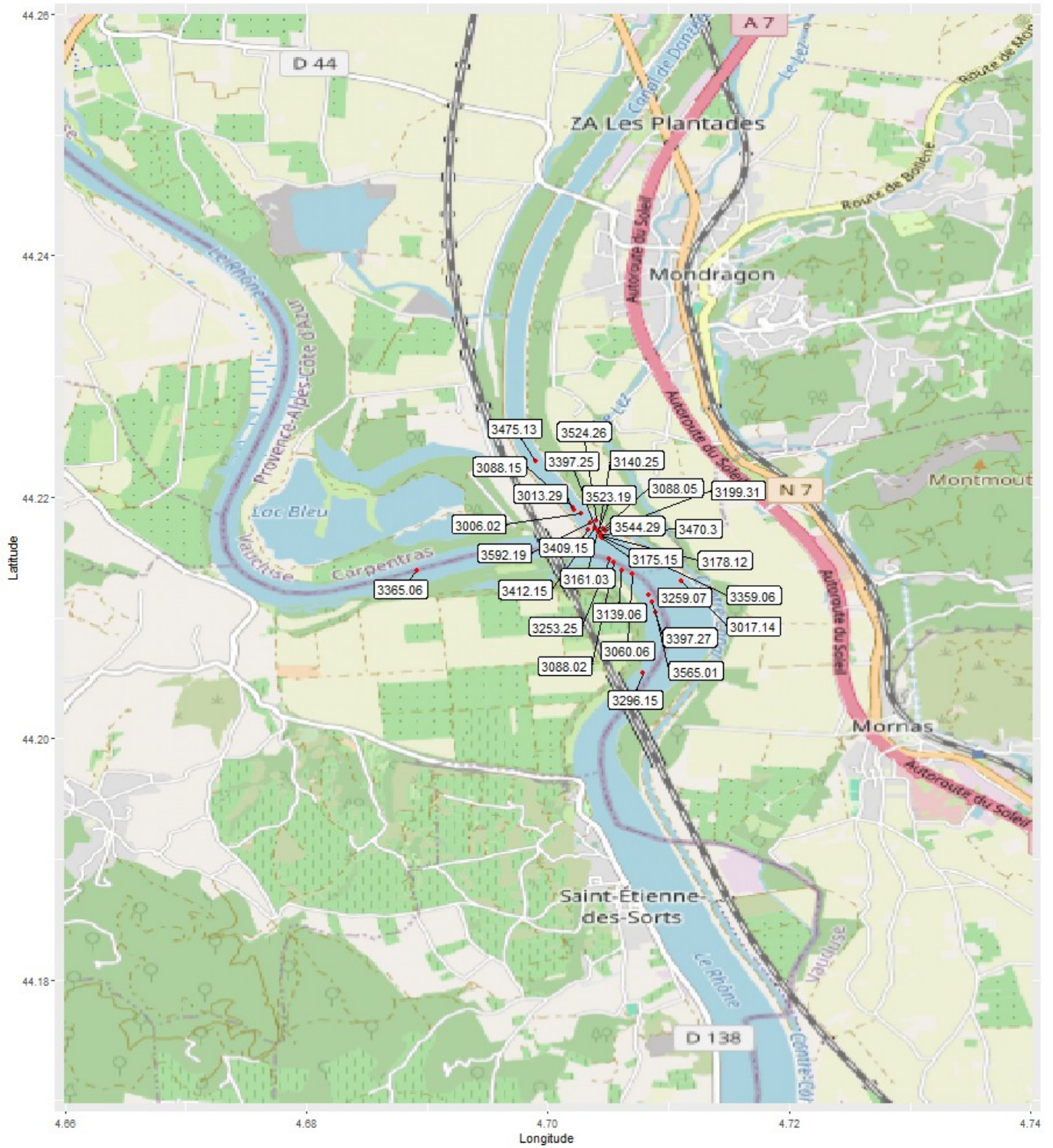


Mobile 9 juin 2020 JOUR

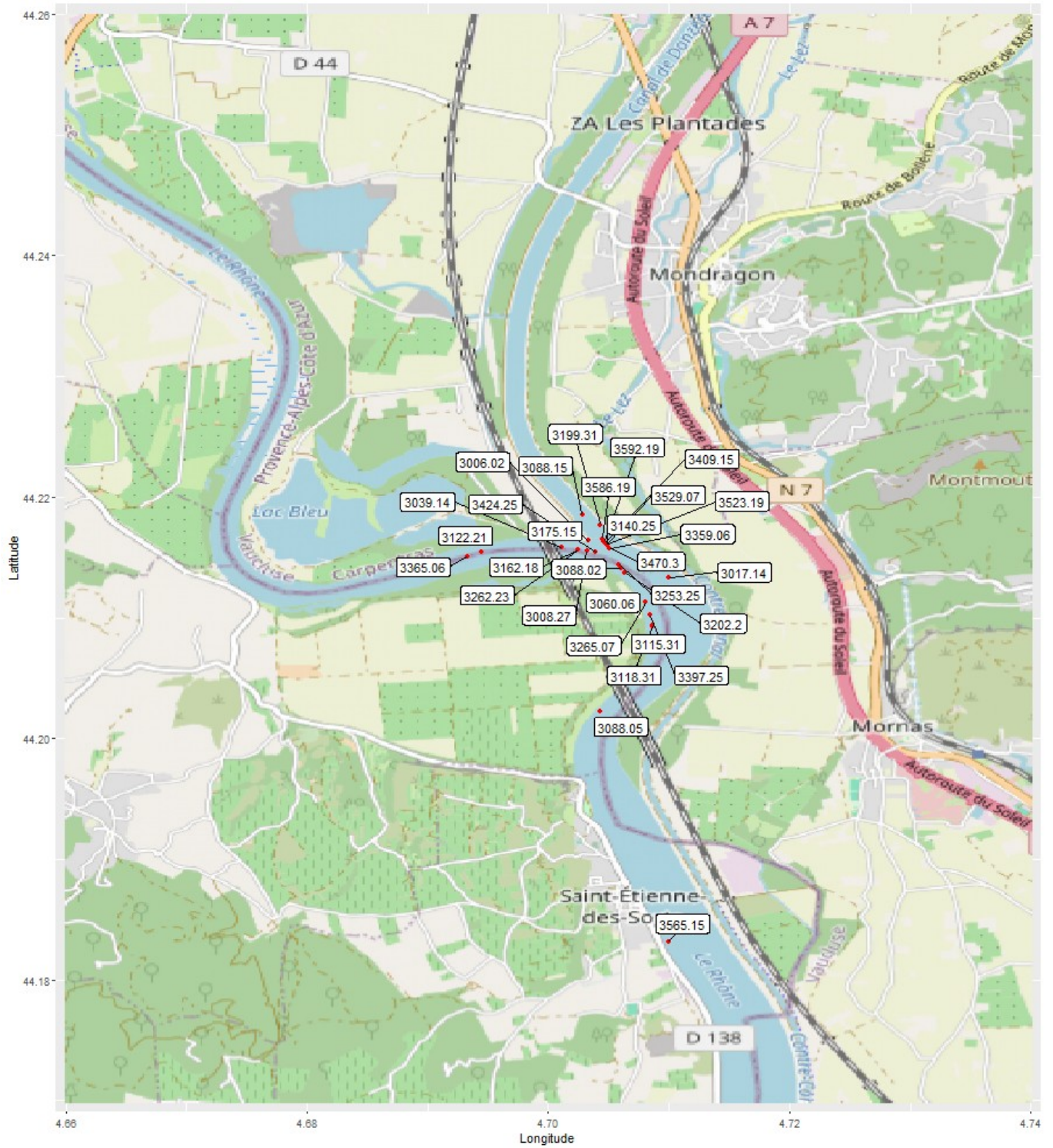


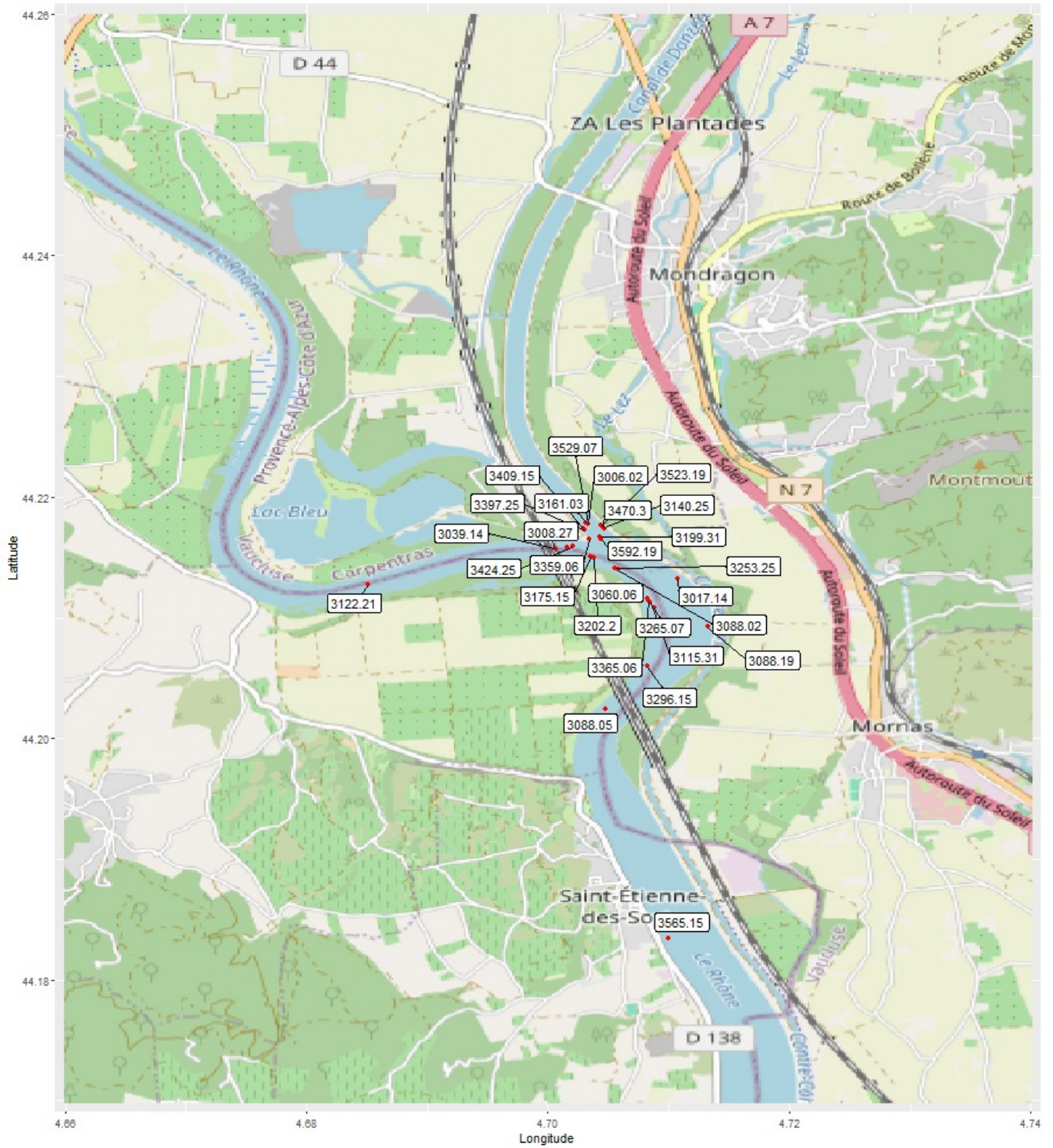
Mobile 7 juil 2020 JOUR



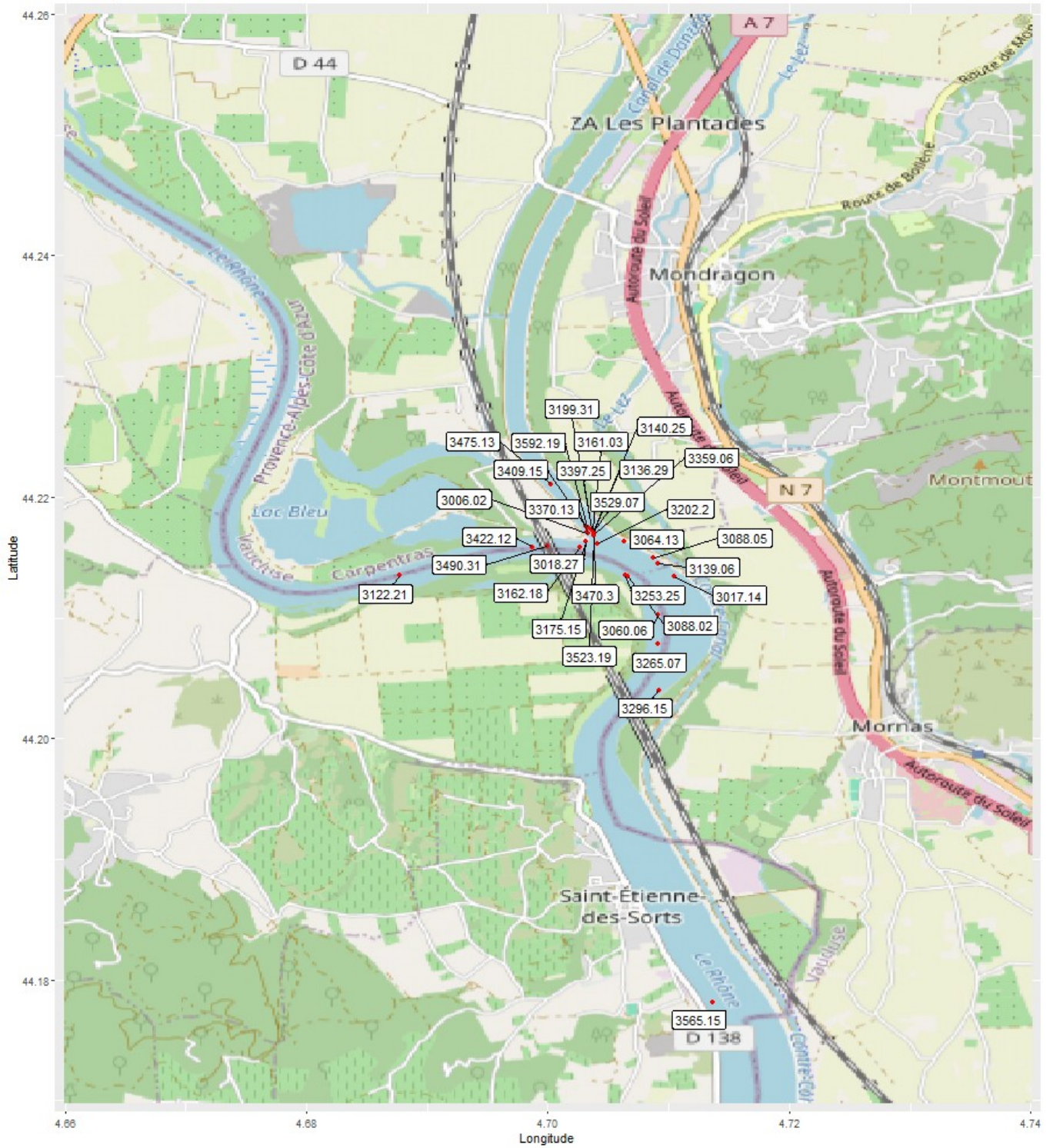


Mobile 11 mars 2021 JOUR

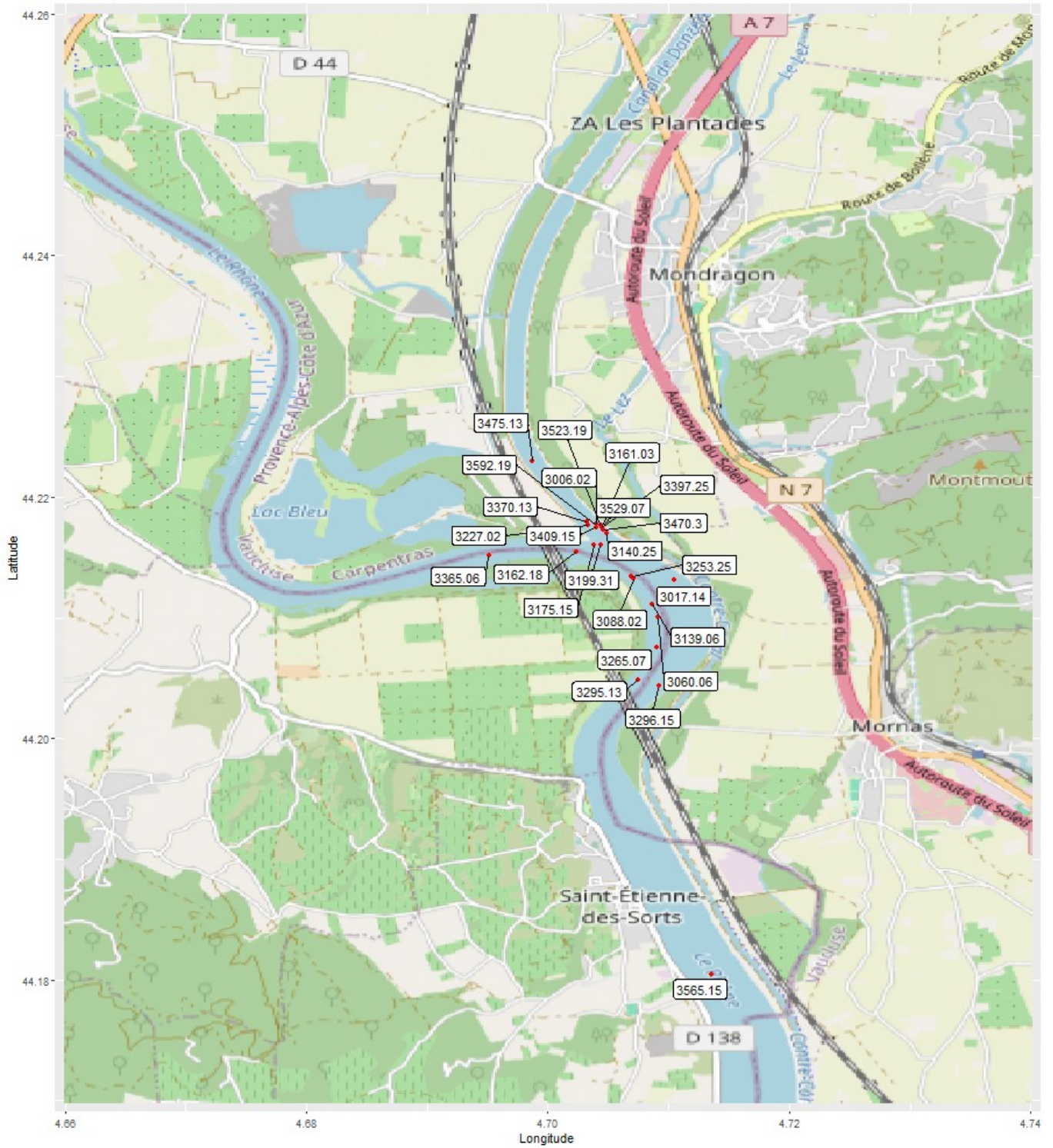




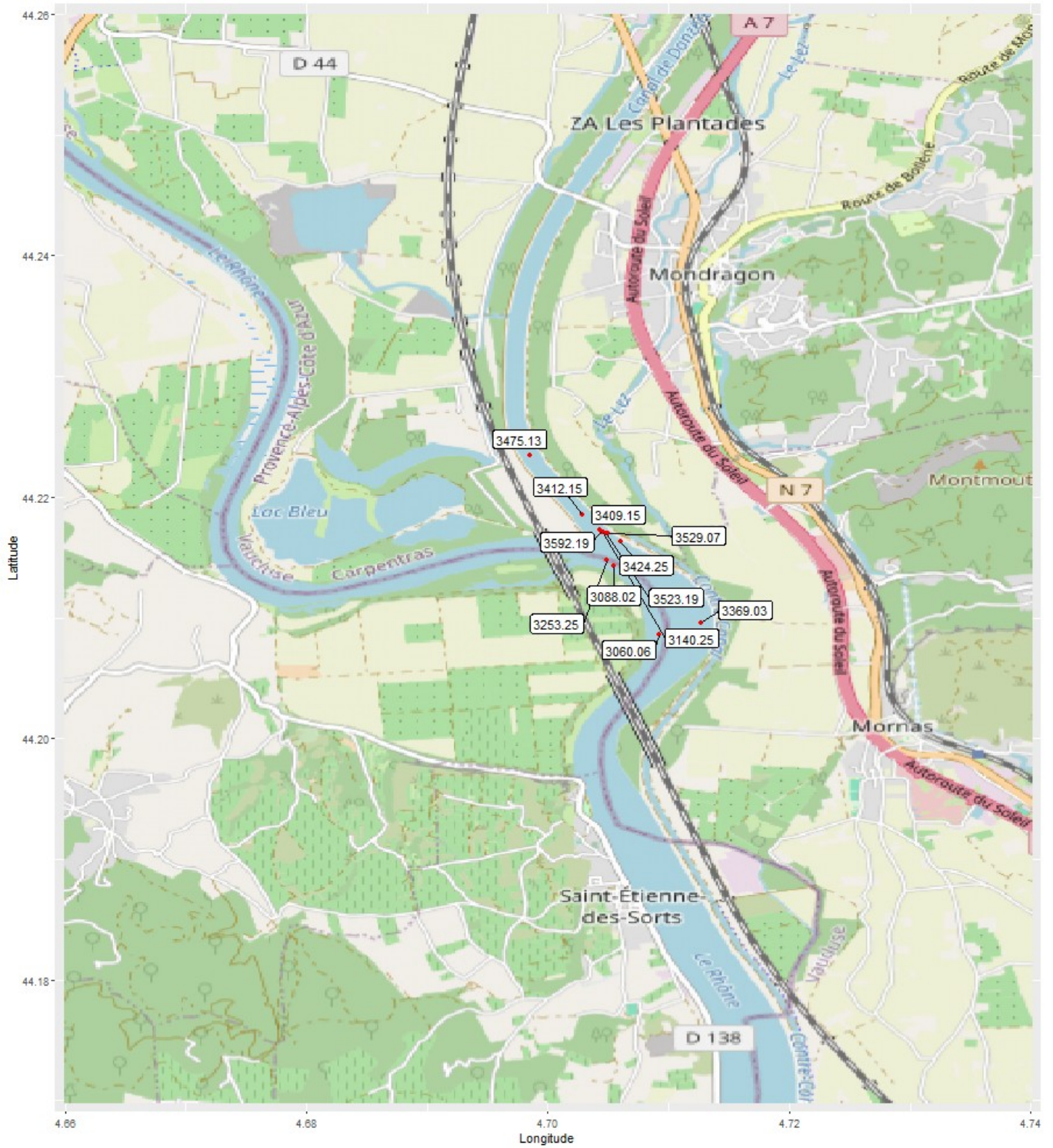
Mobile 9 juin 2021 JOUR



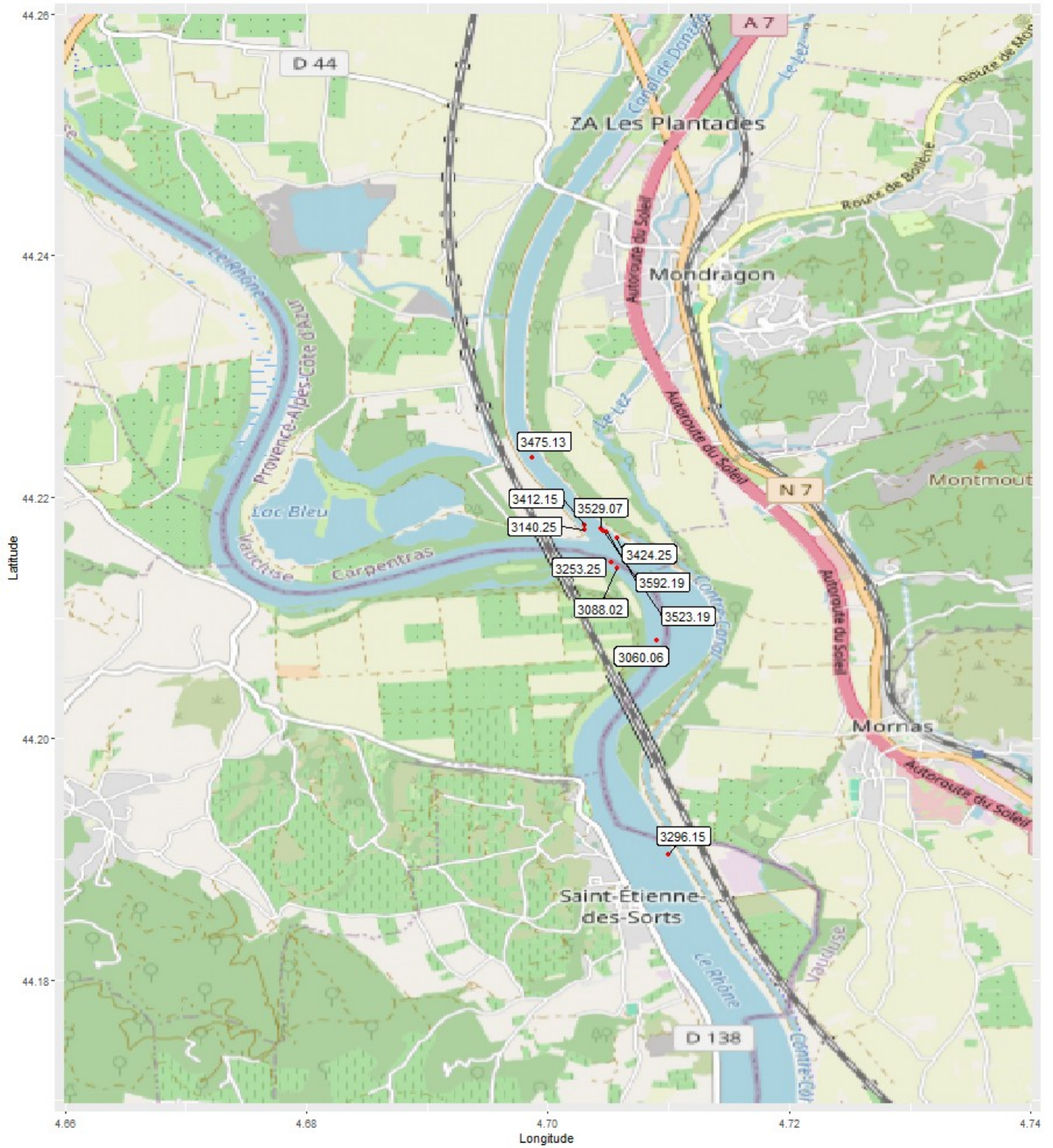
Mobile 7 juil 2021 JOUR



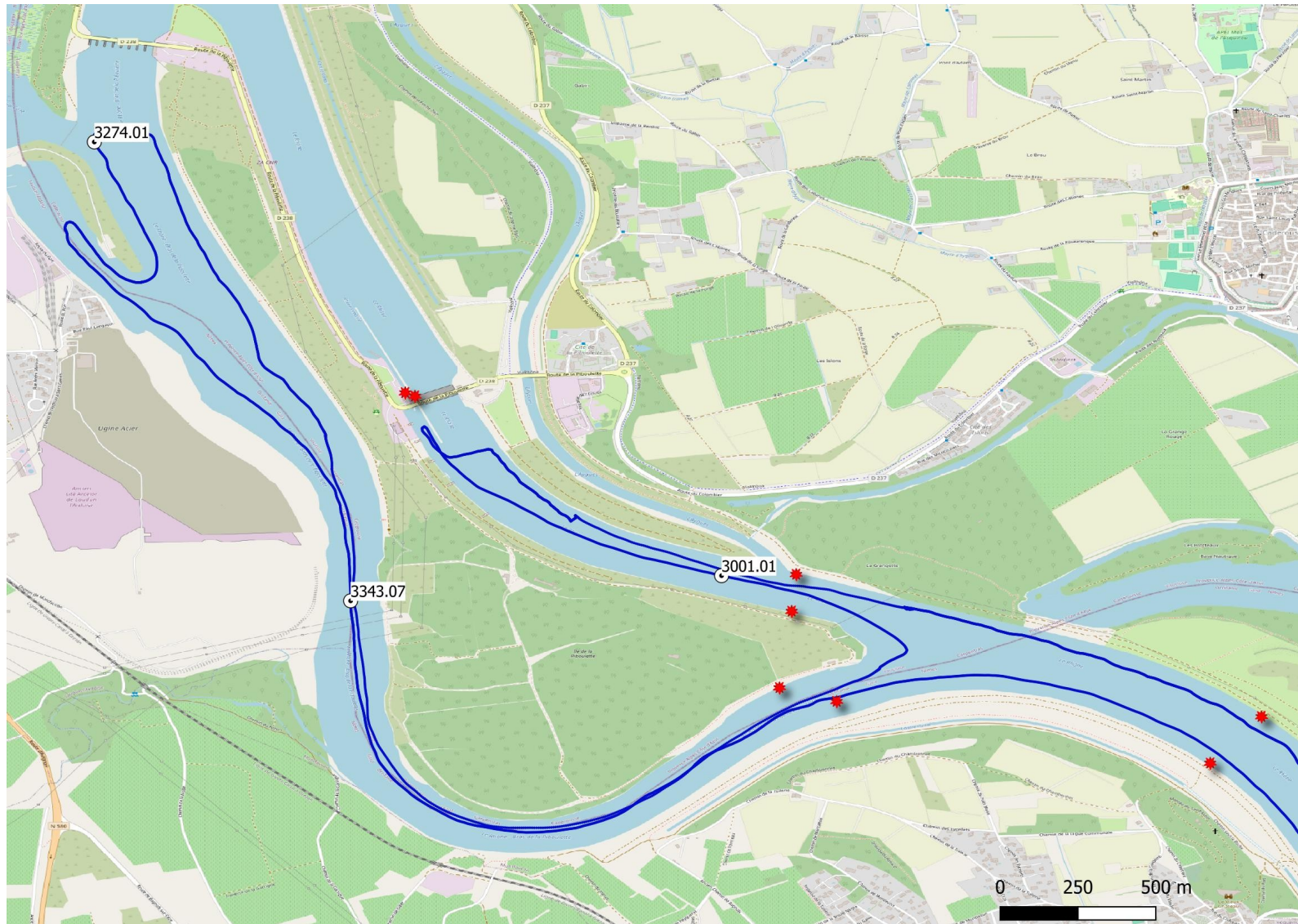
Mobile 3 fev 2022



Mobile 30 mars 2022



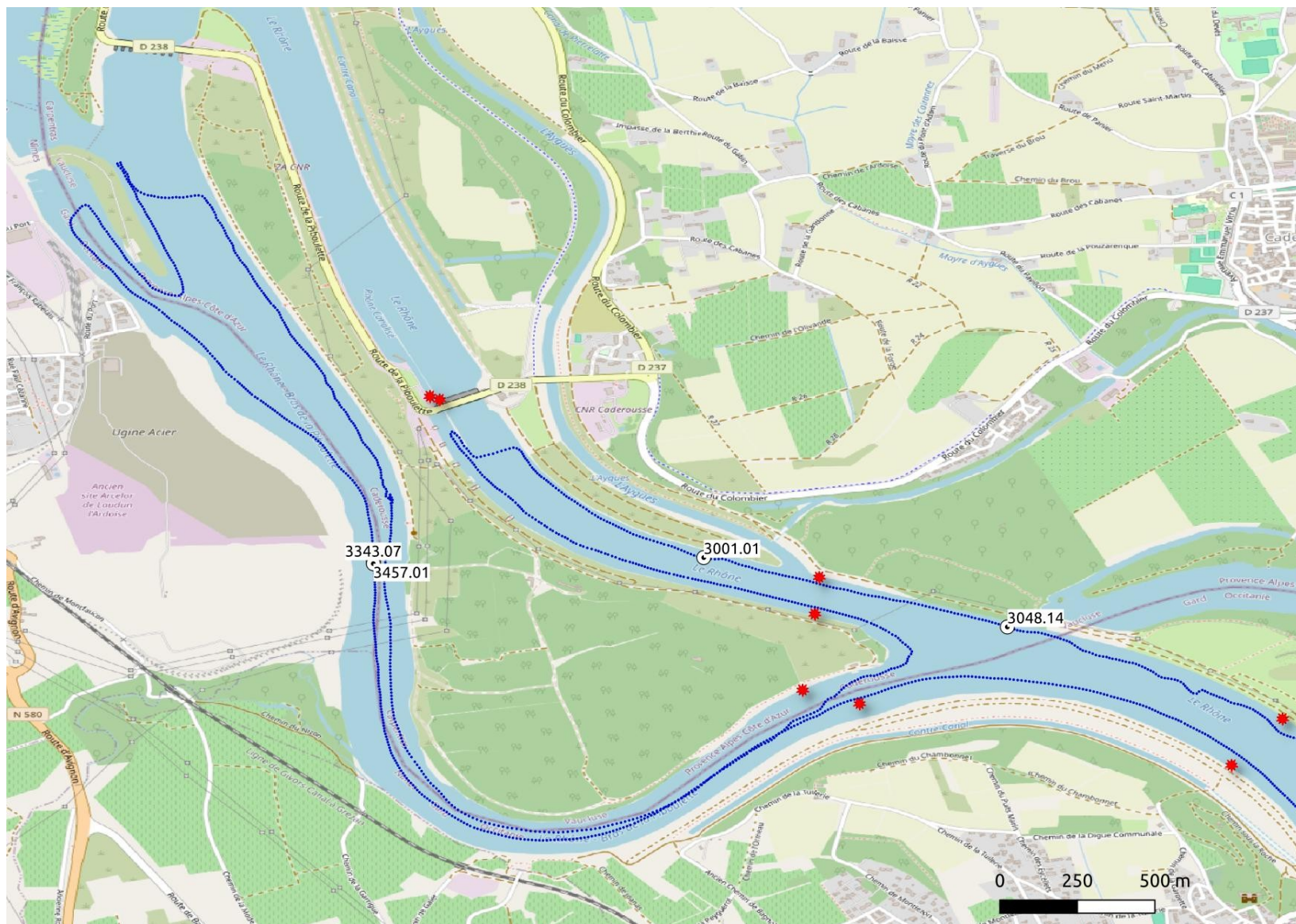
Prospection mobiles aval de jour – cartographies par prospection



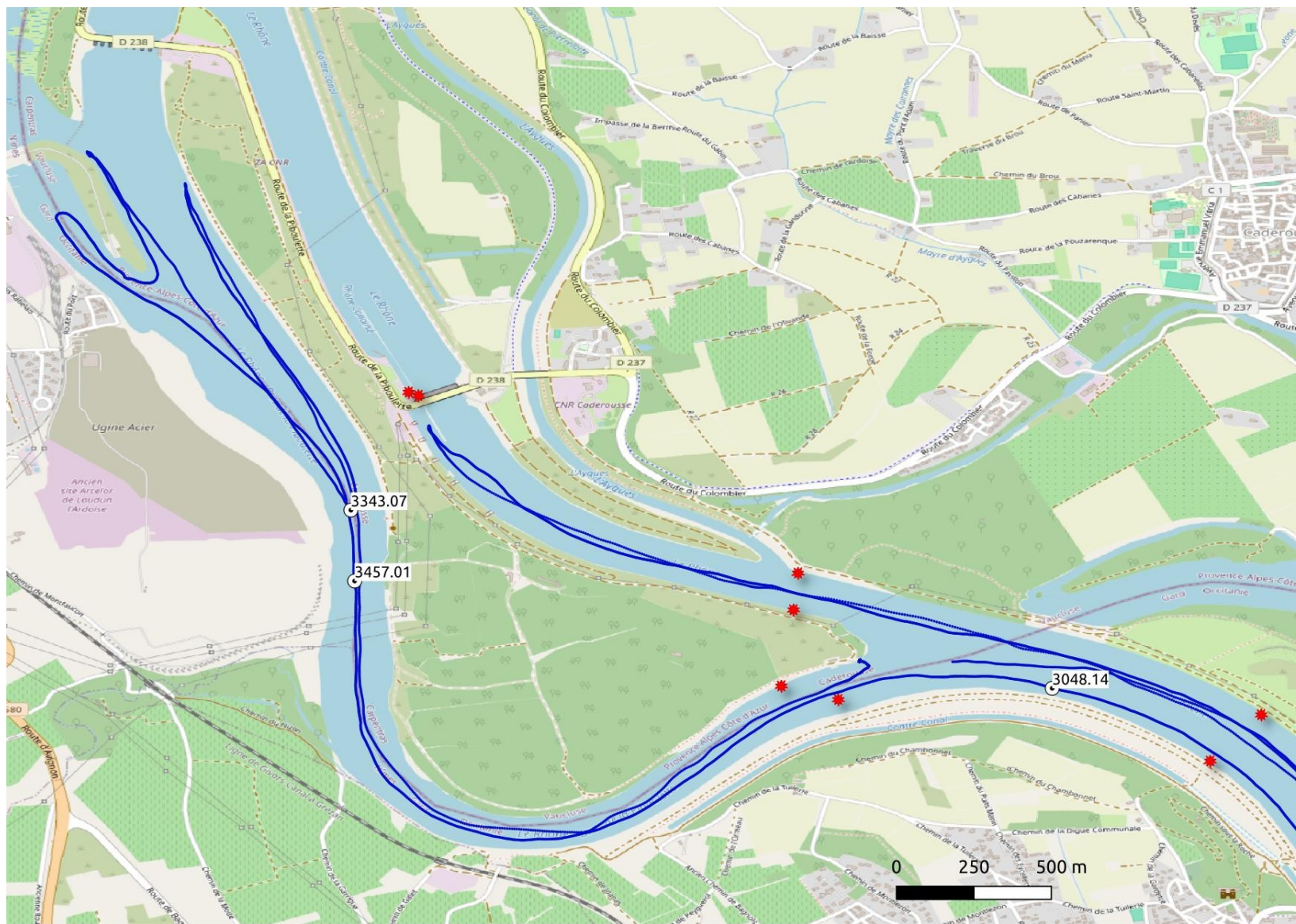
10 juin 2020



8 juillet 2020



10 juin 2021



8 juillet 2021

10- Compte rendu du Séminaire CNR-INRAE sur la dévalaison de l'anguille argentée

Pour clore le projet d'étude des routes de dévalaison des anguilles argentées à travers un aménagement hydroélectrique sur le Rhône à Caderousse (DAARAC), et pour aller plus loin dans l'analyse de nos résultats afin de tirer les conclusions les plus pertinentes possibles, nous avons imaginé pouvoir discuter nos conclusions avec un panel d'experts. Un séminaire a été organisé sur deux jours plein, les 28 et 29 novembre 2022.

L'objectif pour chacun des huit experts invités par la CNR était de préparer :

- une présentation de son expérience (résultats principaux) à propos de la dévalaison des anguilles argentées versus aménagements hydroélectriques (ou autres retenues)
- une argumentation pour répondre aux questions que nous nous posons suite aux résultats du projet DAARAC.

Le séminaire a eu lieu à l'Usine CNR d'Avignon dans la toute nouvelle salle de réunion.

CNR a organisé une visite de la passe à poissons de Sauveterre le 30 novembre (CNR / MRM)

Le présent compte rendu essaie de résumer les messages principaux des interventions. Nous donnons aussi une liste de références (articles et rapports) non exhaustive associées aux discussions. Enfin nous avons laissé les questions posées avant le séminaire pour lesquelles tout le monde peut bien entendu encore donner son avis.

Liste des experts pris en charge :

Eric FEUNTEUN – MNHM Dinard - eric.feunteun@mnhn.fr
Damien SONNY - Profish Technology s.a. - d.sonny@profish-technology.be
Caroline DURIF - Institute of Marine Research - caroline.durif@imr.no
Delphine NICOLAS – Tour du Valat - nicolas@tourduvalat.org
Eric De OLIVEIRA – EDF-LNHE - eric.de-oliveira@edf.fr
Laurent BEAULATON – OFB - laurent.beaulaton@ofb.gouv.fr
Michaël OVIDIO – Université de Liège - M.Ovidio@uliege.be
Johan COECK – INBO – johan.coeck@inbo.be

Liste des personnes invitées non prises en charge

Pascal ROCHE – OFB - pascal.roche@ofb.gouv.fr
Pierre CAMPTON – MRM - p.campton@migrateursrhonemediterranee.org
Thomas POLLIN – CNR - T.POLLIN@cnr.tm.fr

Liste des personnes invitées non prises en charge et absentes

Isabelle EUDES – AERMC - Isabelle.EUDES@eaurmc.fr
Laure CASTEL – AERMC - Laure.CASTEL@eaurmc.fr
Pierre-Jean MARTINEZ – DREAL - Pierre-Jean.MARTINEZ@developpement-durable.gouv.fr

Liste des personnes ressources

Mathieu ROCLE – CNR - M.Rocle@cnr.tm.fr
Franck PRESSIAT – CNR - F.Pressiat@cnr.tm.fr
Hervé PELLA – INRAE – herve.pella@inrae.fr
Hervé CAPRA – INRAE – herve.capra@inrae.fr

Les interventions lors du séminaire :

[l'ensemble des présentations sont disponibles au format PDF]

Mardi 29 novembre

F. Pressiat - CNR : Restauration des continuités piscicoles sur le Fleuve Rhône et ses affluents : comment concilier transition énergétique et transition écologique ?

Après une présentation de la concession (550 km de fleuve avec 19 aménagements) FP a rappelé la position de CNR à propos de la restauration de la continuité. CNR souhaite utiliser le fleuve pour différents usages (énergie, transport...) tout en essayant de le restaurer et de le préserver. Ces actions à visée écologique se font dans un cadre réglementaire européen et français, au sein par exemple du PLAN de GEstion des POissons MIgrateurs, dont l'anguille européenne fait partie. Le PLAGEPOMI fixe par exemple des objectifs de remonté du front de colonisation de l'anguille au-delà de la Drôme en 2027. Ces objectifs sont rendus possibles par la restauration de la continuité écologique sous forme d'ouvrages de franchissement des aménagements (passe à poissons) pour les migrations en direction de l'amont et par une meilleure compréhension de la dynamique de dévalaison à travers les aménagements. Ce besoin de connaissance du franchissement des aménagements CNR sur le Rhône par les anguilles argentées s'illustre par l'évaluation de la mortalité des anguilles causée par le passage dans les turbines et par la quantification des voies de passage des anguilles à travers l'aménagement (barrage et vieux Rhône, canal d'amené et usine (turbines) ou écluse). L'étude de ces routes de dévalaison des anguilles argentées était l'objet du projet multi partenarial DAARAC (cf. présentation de H. Capra).

H. Capra - INRAE: Détermination des routes de dévalaison des anguilles argentées à travers un aménagement CNR sur le bas Rhône : Bilan après 3 années de suivi (2018-2021)

L'ensemble du projet est décrit dans le rapport final que INRAE fournira à CNR pour la fin d'année 2023. Ce rapport devrait être ensuite diffusé à tous les acteurs du PLAGEPOMI_RHÔNE. Mais les données principales sont que 80 % des anguilles qui dévalent franchissent l'aménagement de Caderousse par l'usine et ses turbines. Parmi ces anguilles dévalantes environ 20 % arrivent en Arles, donc sans doute à la mer.

P. Campton - MRM : dévalaison des anguilles argentées en Méditerranée : exemple d'un petit fleuve côtier, la Cagne

PC a présenté une étude menée par MRM sur la Cagne (petit fleuve côtier) visant à comprendre les temps de résidence des anguilles avant l'argenteure et la cinétique de leur dévalaison vers la mer. Globalement les

anguilles marquées (RFID) se déplacent peu et le patron de dévalaison varie fortement d'une année à l'autre sans doute en lien avec la variabilité des conditions environnementales au premier rang desquelles se trouve le débit (principalement le débit d'automne hiver). Il ressort des discussions et des analyses de MRM que le besoin de connaissance de l'échappement (quantité d'anguilles argentées qui sortent en mer) et du/des facteur(s) principal(aux) qui déclenche la dévalaison est sans doute le défi le plus urgent et important à venir.

Pour l'ensemble des résultats et des perspectives, le parallèle avec le Rhône est assez frappant.

D. Nicolas : Suivis anguille en Camargue

DN a présenté les travaux menés sur les lagunes-étangs connectés à la mer par des réseaux de canaux qui comportent beaucoup d'obstacles à la migration. Ces études s'intéressent à l'ensemble du cycle « continental » de l'anguille, du stade civelle (arrivée ; janvier-mars) au stade anguille argentée (échappement ; octobre à mai). Dans ces milieux il est possible d'envisager une quantifications des abondances-stocks (ex avec procédure CMR, ou utilisation de caméras acoustiques). Les marquages (RFID) permettent aussi de suivre les déplacements des individus marqués. Les obstacles à la migrations sont souvent des infrastructures ayant une utilité dans la gestion de la salinité et des niveaux d'eau. Donc une gestion fine de ces aménagements (intégrant la possibilité de les supprimer) doit être mise en œuvre face aux exigences écologiques de l'anguille à chacun de ses stades de développement (donc sur 4-5 ans minimum). Ce sont les seuls milieux qui offrent pour le moment la possibilité d'estimer un indice de recrutement ou de caler un modèle d'échappement. Il existe aussi une pression de pêche importante mais il est difficile d'obtenir des données précises de capture.

Un objectif pourrait être d'évaluer les parts respectives des lagunes-étangs versus celle du bassin du Rhône dans la participation au stock d'anguilles qui s'échappent de la façade Méditerranéenne française.

E. Feunteun : Le paradoxe de l'anguille : favoriser la fitness et la survie? 25 années de recherche sur la migration de reproduction des anguilles

EF a présenté son expérience acquise sur l'écologie de l'anguille en se focalisant sur la migrations des anguilles argentées en évoquant les principaux facteurs environnementaux qui compliquent dangereusement cette dévalaison. Sur la Loire une étude très poussée a permis d'évaluer le stock annuel d'anguilles argentées (CMR), qui s'est effondré en 2005 sans remonter (et même plutôt en continuant à décroître). Les études biométriques montrent également (comme sur le Frémur) une augmentation de la proportion de mâles dévalant, une diminution de la taille moyenne des femelles de 10 à 20 cm (ce qui réduit in fine la fécondité) et un vieillissement de 2.4 ans des femelles. Enfin il semble exister trois comportements de dévalaison : 1) une migration de 40 à 100 km/j (avec une forte variabilité interindividuelle sous-jacente à une augmentation de la vitesse de dévalaison qui augmente avec la taille) ; 2) une migration très lente à une vitesse de 5-10 km/j ou enfin 3) des individus qui attendent un an supplémentaire. L'expérimentation démarrée récemment (2020) sur la Sélune permet de tester l'hypothèse selon laquelle l'ouverture du BV amont par suppression de deux barrages doit améliorer la croissance des individus et donc une augmentation du stock de géniteurs potentiels. Mais il a été mis en évidence des teneurs importantes en contaminants de toutes sortes (éléments traces, PCBs, organiques...) dont l'effet principal serait de limiter la croissance et par conséquent la fécondité. Une étude en cours montre qu'il existe un effet BV très fort sur l'expression des traits de vie des anguilles (par exemple les ressources trophiques), mais que l'effet des contaminants est encore plus important. Enfin les aménagements de type barrage sont responsables du blocage de 30 % à 100 % des anguilles argentées qui pourraient dévaler (ex 70 % au niveau de l'usine marémotrice de la Rance ; 95 % sur le Frémur ou 85 % sur le Lac de Grand Lieu) et d'une importante mortalité (par exemple seulement 50 % des anguilles argentées qui devalent à

travers le grand canal d'Alsace survivent). Il reste encore des progrès à faire en termes de gestion des aménagements pour les rendre le plus transparents possible pour la réalisation complète du cycle de vie de l'anguille dans sa composante continentale (de civelle à anguille argentée). Pour cela, des outils tels que SilRPeak qui prédit les pics de dévalaison à partir du débit ou tel que le logiciel Eel Management capable de prédire le taux d'échappement sous différents scénarios de gestion, seront très précieux. Et maintenant que nous sommes de plus en plus proches de prouver que l'anguille européenne migrent jusqu'aux Sargasses, via les Açores, il devient urgent de comprendre les effets des contaminants spécifiques à chaque BV sur les populations d'anguilles argentées pour comprendre par exemple 1) pourquoi les anguilles de la Loire n'ont pas le même pattern d'oscillation verticale nyctémérale lors de leur migration océanique ? et 2) quels en sont les conséquences en termes de fitness pour l'espèce ?

Mercredi 30 novembre

D. Sonny : LIFE4FISH : eel protection in the Meuse River ; WALLONEEL Project (Meuse) ; The Norman Seine : eel protection.

DS a présenté trois projets centrés sur la dévalaison de l'anguille argentée dans la Meuse et la Seine.

Sur la Meuse (Life4Fish et Walloneel) et la Seine -Norman Seine) les anguilles marquées (argentées, FIV-V mais aussi FIII, > 700 mm) ont majoritairement pu être contactées (80-100 de détection). De 51 % à 64 % des anguilles marquées ont été considérées comme ayant dévalé. Entre 26 % et 32 % ont franchi un aménagement, avec seulement 9% des individus marqués qui ont franchi les 6 aménagements de l'étude Life4Fish. Parmi les individus marqués 87.5 % des anguilles qui dévalent passent par les turbines. Les mortalités estimées lors des franchissements via les turbines varient de 13.1 % à 20 % sans système d'évitement. La mortalité estimée lors des passage via le barrage est de 6 % à 8 %.

Des solutions ont été testées pour éviter l'impact très négatif du passage par les turbines. Le remplacement des turbines actuelles par des turbines plus anguilles-compatibles permet de réduire de moitié la mortalité. En revanche l'arrêt de turbinage semble peu efficace, même si le jour de dévalaison le plus probable, déterminé en fonction des changements de débit et du débit le jour J (Teichert et al. 2020), est valide (80 % des passages ce jour là). En revanche sur la Seine, une réduction du débit de turbinage de 34 % est une solution très efficace puisque 82 % des passage se font via le barrage. Dans la configuration de l'aménagement testé sur la Meuse, la pose d'une barrière électrique réduit de 87.5 % à 42 % le taux de passage par les turbine par rapport au barrage.

E. De Oliveira : Mesures de protection de l'anguille au niveau des ouvrages hydroélectriques, Montaison et Dévalaison. Expérience d'EDF : Rhin, Meuse, Dordogne

L'installation de structures de protection de l'anguille devant les prises d'eau telles que les grilles fines est une solution fiable à 100 % mais malheureusement non envisageable pour des aménagements de plus de 100 m³/s.

Sur le Rhin, l'aménagement du Grand Canal d'Alsace (GCA) était ciblé pour étudier la migration de dévalaison des anguilles argentées pour évaluer l'intérêt de moduler la production hydro-électrique lors

de la période la plus probable de franchissement (évaluée par le modèle d'Ecogea – Basse Dordogne et/ou Teichert et al., 2020). Les résultats sont regroupés dans Trancart et al. (2018). Les anguilles transloquées dévalent beaucoup (38 % à 90 % selon origine) dans les 7 j post marquage (56 % des individus qui dévalent). 68 % des individus marqués dévalent (32 % jamais détectés à la première porte NEDAP); 93 % d'entre eux passent par le GCA et seulement 7 % par le Vieux Rhin (VR) surtout à bas débit (i.e. pas de déversement). De manière surprenante, seulement 30-31 % des anguilles passées par le VR en sortent, contre 50 % des anguilles passées par le GCA (4 aménagements dont le taux de mortalité-turbines varie de 7 % à 22%). En terme de gestion des débits lorsque le débit du VR augmente fortement (+ 200 m³/s) le nombre de passages par le VR augmente fortement (attention ces conditions sont rares). La configuration des aménagement et la proportion de débit dans TCC / Canal d'aménagé sont très importantes pour le choix de la voie de passage (attraction). 80 % des dévalaisons sont observées de nuit, principalement entre octobre et décembre, mais aussi avril-mai et le temps de franchissement de l'ensemble du GCA va de moins d'un jour à plus de 300 j.

La quantification de l'échappement demeure un des objectifs principaux. Une solution alternative au CMR et non intrusive est l'utilisation des cameras acoustiques. Cette technique est en plein essor notamment pour ce qui concerne le traitement des images, très chronophage pour le moment.

Dans le cadre du projet Life4Fish, Teichert et al. (2020) ont développé un modèle (Topsis score) qui vise l'optimisation de la production hydroélectrique en minimisant la mortalité des anguilles et les pertes énergétiques, principalement basé sur les débits et la variabilité de ces débits.

J. Coeck : Eel migration and water management in the lowland area of Flanders (Belgium)

En Flandres il existe des milieux aquatiques de différentes tailles, limités spatialement par la mer et l'estuaire de la rivière Scheldt, dont la productivité est forte : biomasse d'anguille de l'ordre de 200 kg/Ha. Mais malgré la proximité avec la mer les migrations des anguilles, civelles ou argentées, ne sont pas si facile. Pour les civelles il semble encore possible qu'un stock important puisse « entrer » dans les habitats de croissance. Pour les anguilles argentées, les pompes utilisées pour limiter le niveau d'eau des polders sont très dangereuses avec des mortalités pouvant atteindre 100 % en fonction des hélices et de leur vitesse de rotation. Une « F/N axial pump » permet cependant de limiter la mortalité à 2 %.

Etude réalisée avec 553 indiv capturés pour 69 femelles marquées (FII à FV) et 62 suivies (90%) - (Verhelst et al. 2018 <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.10.018>). La Migration s'observe principalement en octobre, mais s'étale d'août jusqu'à décembre. Ici, migration signifie passage par les pompes. Malgré une très forte variabilité comportementale entre les individus, une forte corrélation entre une forte augmentation du débit après un étiage et la quantité d'individus qui franchissent les pompes est observée. Un total de 64 % des individus marqués arrivent en mer, ayant très majoritairement franchi les obstacles par les pompes. Il y a un nombre important d'anguilles qui sont passées par les pompes et qui n'ont pas de caractère d'argenture. L'expérimentation de le Canal Albert (Verhelst et al. 2018 <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.05.013>) montre que seulement 35 % des individus marqués dévalent jusqu'à la mer. Chaque aménagement franchi conduit à un certain pourcentage d'arrêt de dévalaison (4 % à 7%) ainsi que chaque tronçon entre deux aménagement (5 % à 20 %). Sur le complexe Ham, l'étude en 2D à montré que 65 % des 86 anguilles marquées (35 % ne dévalent pas) dévalaient principalement (45 %) par l'écluse et par l'usine (14 %).

C. Durif : Physiologie de l'argenture et orientation magnétique chez l'anguille argentée

CD nous a présenté ses connaissances sur l'argenture, les mouvements migratoires et la dévalaison proprement dite. La définition des différents stades d'argenture (Durif et al., 2005) nous rappelle que le stade FIII correspond à des individus qui commencent / qui vont commencer leur dévalaison. Il y a donc un risque à marquer des FIII. Les FV en revanche sont clairement en dévalaison (avancées dans la régression du tractus digestif) et les FIV sont des « FV qui se remettent à manger ». Les anguilles n'ont quasiment aucune activité la journée. En résumé très sommaire la photopériode et la température qui baisse déclencherait l'argenture et la lumière et d'autres facteurs déclencherait la migration vers l'aval. L'augmentation de la température de l'eau et la baisse des débits seraient responsables d'une avancée d'environ 15 j de la date à laquelle 50 % des captures (pêche professionnelle) ont été effectuées (EF com. pers.). Enfin CD propose une hypothèse selon laquelle les déplacements des anguilles pourraient suivre un déterminisme magnétique (Cresci et al., 2019); par exemple les adultes suivraient une différence de champ magnétique du plus fort vers le plus faible. Selon cette hypothèse la migration vers la mer des Sargasses peut s'envisager selon un recherche d'isoline de champ magnétique, qui serait d'abord trouvée en descendant via les Açores puis longée jusqu'aux Sargasses.

M. Ovidio : Synthèse des études anguille – saumons dans le bassin de la Meuse

MO nous a présenté une synthèse de son expérience issue de ses travaux sur l'anguille et sur le saumon atlantique sur le bassin versant de la Meuse. Le parallèle avec les travaux menés sur le saumon atlantique est intéressant à faire pour se rendre compte des connaissances acquises en fonction des moyens mis en œuvre et des résultats obtenus en terme de dynamique des populations. MO constate comme partout un effondrement du « recrutement » illustré par une très forte diminution du nombre de passages d'anguilles jaunes dans les passes à poissons suivies. Alors, comme pour le saumon MO à proposer de mener une expérimentation de repeuplement (translocation de civelles de 100 mm à 320 mm) avec un suivi individuel continu grâce à un marquage pit-tag des individus de plus de 2 g. Ces travaux mettent en évidence une belle croissance (51 mm en 6 mois en moyenne), avec bien entendu une forte variabilité inter-individuelle, et de forts taux de survie (> 80%). Les jeunes anguilles préfèrent nettement les berges avec blocs et racines et avec des vitesses plutôt faibles (faciès de type plat principalement) et sont majoritairement (47%) stationnaires. Un sexage d'une partie des individus suivis a montré une large proportion de femelles par rapport aux mâles. Enfin, MO a pu observer des anguilles argentées, principalement FI et FV et dans une moindre mesure FII et MII (à comparer à la très large prédominance de FIII dans le Rhône). La présentation des expérimentations menées sur la dévalaison des smolts de saumon atlantique montre que la vitesse de courant est, comme pour l'anguille, un facteur très important pour la dévalaison et le choix des voies de passage. Comme sur le Rhin (EdO) la proportion de débit entre la Meuse et le Canal Albert, donc la répartition des vitesses d'écoulement, influence fortement le choix des routes de dévalaison des smolts. Enfin une étude menée en 2012 (Nedap) a montré un taux d'échappement d'anguilles argentées de l'ordre de 15 % (Verbiest et al., 2012 ; n=31 marquées ; 4 origines différentes et stades d'argentures de FIII à FV), à une allure moyenne de 53 km/j (vitesse max = 30 km en 4h15).

L. Beaulaton : Évaluation des populations d'anguilles

LB a rappelé le contexte réglementaire de la gestion des population d'anguilles en particulier. Une organisation à l'échelle internationale le CIEM (ICES en anglais) émet un avis, basé sur un travail scientifique, qui doit être récurrent (donc émis tous les ans) pour l'anguille européenne quant à l'exploitation de cette ressource. Son/ses conseil-s sont normalement repris par l'Union Européenne.

Compte tenu des estimations des stocks et du recrutement (les deux étant au plus bas) la dernière préconisation du CIEM est assez simple à comprendre : ZERO capture, que ce soit en pêche professionnelle ou amateur. Les experts demandent à ce qu'aucune mortalité autre que naturelle influence la dynamique des populations (pas même pour le repeuplement) et que la qualité et la quantité d'habitat favorable à l'anguille (dans ses dimensions physique, chimique et biologique) ainsi que la continuité soit préservé et restauré.

Cela se traduit in fine par une interdiction totale de la pêche amateur et la fermeture de la pêche pro pendant 6 mois consécutifs (centrés au maximum sur les phases d'argenteure et civelle). Par conséquent les captures, de civelles par exemple, demeurent toujours bien plus hautes que la cible proposée par le CIEM et sont même en forte augmentation depuis 2015 (faisant suite à une forte baisse entre 2000 et 2014).

L'estimation des densités et des mortalités d'anguilles européennes est un énorme challenge (cf. tout le travail du projet SudoAng par exemple ; modèle EDA) Pour ce qui concerne le BV du Rhône le constat principal est l'absence de donnée de qualité sur le stock en place. De plus, les fortes probabilités de présence ne concernent que l'aval du bassin, sur sa bordure méditerranéenne (très différent en cela de l'Adoure-Garonne, de la Loire ou de la Seine).

11- Références bibliographiques

- Aarestrup, K., Thorstad, E.B., Koed, A., Svendsen, J.C., Jepsen, N., Pedersen, M.I., Økland, F., 2010. Survival and progression rates of large European silver eel *Anguilla anguilla* in late freshwater and early marine phases. *Aquatic Biology* 9, 263–270. <https://doi.org/10.3354/ab00260>
- Acou, A., 2006. Bases biologiques d'un modèle pour estimer la biomasse féconde de l'anguille européenne en fonction des recrues fluviales et du contexte de croissance: approche comparative à l'échelle de petits bassins versants, Ph.D. thesis. France: University of Rennes 1, 315 pp.
- Acou, A., Boury, P., Laffaille, P., Crivelli, A., Jean Feunteun, E., 2005. Towards a standardized characterization of the potentially migrating silver European eel (*Anguilla anguilla*, L.). *Archiv für Hydrobiologie* 237–255. <https://doi.org/10.1127/0003-9136/2005/0164-0237>
- Acou, A., Laffaille, P., Legault, A., Feunteun, E., 2008. Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system. *Ecology of Freshwater Fish* 17, 432–442. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2008.00295.x>
- Algera, D.A., Rytwinski, T., Taylor, J.J., Bennett, J.R., Smokorowski, K.E., Harrison, P.M., Clarke, K.D., Enders, E.C., Power, M., Bevelhimer, M.S., Cooke, S.J., 2020. What are the relative risks of mortality and injury for fish during downstream passage at hydroelectric dams in temperate regions? A systematic review. *Environ. Evid.* 9, 3. <https://doi.org/10.1186/s13750-020-0184-0>
- Ben Ammar, I., Cornet, V., Houndji, A., Baekelandt, S., Antipine, S., Sonny, D., Mandiki, S.N.M., Kestemont, P., 2021. Impact of downstream passage through hydropower plants on the physiological and health status of a critically endangered species: The European eel *Anguilla anguilla*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 254, 110876. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.110876>
- Bergé, J., Capra, H., Pella, H., Steig, T., Ovidio, M., Bultel, E., Lamouroux, N., 2012. Probability of detection and positioning error of a hydro acoustic telemetry system in a fast-flowing river: Intrinsic and environmental determinants. *Fisheries Research* 125–126, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.008>
- Besson, M.L., Trancart, T., Acou, A., Charrier, F., Mazel, V., Legault, A., Feunteun, E., 2016. Disrupted downstream migration behaviour of European silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river. *Environ Biol Fish* 99, 779–791. <https://doi.org/10.1007/s10641-016-0522-9>
- Boubée, J.A., Mitchell, C.P., Chisnall, B.L., West, D.W., Bowman, E.J., Haro, A., 2001. Factors regulating the downstream migration of mature eels (*Anguilla* spp.) at Aniwhenua Dam, Bay of Plenty, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 35, 121–134. <https://doi.org/10.1080/00288330.2001.9516982>
- Bourillon, B., Feunteun, E., Acou, A., Trancart, T., Teichert, N., Belpaire, C., Dufour, S., Bustamante, P., Aarestrup, K., Walker, A., Righton, D., 2022. Anthropogenic contaminants shape the fitness of the endangered European Eel: a machine learning approach. *Fishes* 7, 274. <https://doi.org/10.3390/fishes7050274>

Breteler, J.K., Vriese, T., Borcharding, J., Breukelaar, A., Jörgensen, L., Staas, S., de Laak, G., Ingendahl, D., 2007. Assessment of population size and migration routes of silver eel in the River Rhine based on a 2-year combined mark-recapture and telemetry study. *ICES Journal of Marine Science* 64, 1450–1456. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm130>

Brown, L., Boubée, J., Haro, A., 2007. Behaviour and fate of downstream migrating eels at hydroelectric power station intakes. *Proceedings of the 6th International Symposium on Ecohydraulics*, Christchurch, NZ.

Brujjs, M.C.M., Hadderingh, R.H., Schwevers, U., Adam, B., Dumont, U., Winter, H.V., 2009. Managing human impact on downstream migrating European eel in the River Meuse, in: *Eels at the Edge; Science, Status, and Conservation Concerns*. pp. 381–390.

Brujjs, M.C.M., Durif, C.M.F. (2009). Silver Eel Migration and Behaviour. In: van den Thillart, G., Dufour, S., Rankin, J.C. (eds) *Spawning Migration of the European Eel*. Fish & Fisheries Series, vol 30. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9095-0_4

Bultel, E., Lasne, E., Acou, A., Guillaudeau, J., Bertier, C., Feunteun, E., 2014. Migration behaviour of silver eels (*Anguilla anguilla*) in a large estuary of Western Europe inferred from acoustic telemetry. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 137, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.023>

Bureau du Colombier, S., Lambert, P., Bardonnnet, A., 2008. Is feeding behaviour related to glass eel propensity to migrate? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.08.015>

Calles, O., Olsson, I.C., Comoglio, C., Kemp, P.S., Blunden, L., Schmitz, M., Greenberg, L.A., 2010. APPLIED ISSUES: Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. *Freshwater Biology* 55, 2167–2180. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02459.x>

Calles, O., Karlsson, S., Vezza, P., Comoglio, C., Tielman, J., 2013. Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology* 58, 2168–2179. <https://doi.org/10.1111/fwb.12199>

Calles, O., Elghagen, J., Nyqvist, D., Harbicht, A., Nilsson, P.A., 2021. Efficient and timely downstream passage solutions for European silver eels at hydropower dams. *Ecological Engineering* 170, 106350. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106350>

Capaldo, A., Gay, F., Lepretti, M., Paoletta, G., Martucciello, S., Lionetti, L., Caputo, I., Laforgia, V., 2018. Effects of environmental cocaine concentrations on the skeletal muscle of the European eel (*Anguilla anguilla*). *Science of The Total Environment* 640–641, 862–873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.357>

Clemens, B.J., Matley, J.K., Klinard, N.V., Lennox, R.J., Sortland, L.K., Cooke, S.J., 2023. The Need for Reporting Rationale and Detailed Methods in Studies that Surgically Implant Fish with Electronic Tracking Devices. *Fisheries* 48, 388–394. <https://doi.org/10.1002/fsh.10963>

CNR-Normandeau. 2011. Evaluation des taux de survie et de blessures des anguilles passant à travers une turbine de grande taille à la centrale hydroélectrique de Beaucaire sur le Rhône. Rapport Final. 149 pp.

- Drouineau, H., Bau, F., Alric, A., Deligne, N., Gomes, P., Sagnes, P., 2017. Silver eel downstream migration in fragmented rivers: use of a Bayesian model to track movements triggering and duration. *Aquat. Living Resour.* 30, 5. <https://doi.org/10.1051/alr/2017003>
- Drouineau, H., Durif, C., Castonguay, M., Mateo, M., Rochard, E., Verreault, G., Yokouchi, K., Lambert, P., 2018. Freshwater eels: A symbol of the effects of global change. *Fish Fish.* 19, 903–930. <https://doi.org/10.1111/faf.12300>
- Durif, C., Dufour, S., Elie, P., 2005. The silvering process of *Anguilla anguilla*: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *Journal of Fish Biology* 66, 1025–1043. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2005.00662.x>
- Durif, C., Guibert, A., Elie P., 2009. Morphological discrimination of the silvering stages of the European eel. In: Casselman JM, Cairns DK (eds) *Eels at the edge: science, status, and conservation concerns*. American Fisheries Society Symposium 58, Bethesda, Maryland, pp 103-111.
- Durif, C.M.F., Diserud, O.H., Sandlund, O.T., Thorstad, E.B., Poole, R., Bergesen, K., Escobar-Lux, R.H., Shema, S., Vøllestad, L.A., 2020. Age of European silver eels during a period of declining abundance in Norway. *Ecology and Evolution* 10, 4801–4815. <https://doi.org/10.1002/ece3.6234>
- Durif, C.M.F., Elie, P., 2008. Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data. *Fisheries Management and Ecology* 15, 127–137. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2008.00593.x>
- Durif, C.M.F., Travade, F., Rives, J., Elie, P., Gosset, C., 2008. Relationship between locomotor activity, environmental factors, and timing of the spawning migration in the European eel, *Anguilla anguilla*. *Aquatic Living Resources* 21, 163–170. <https://doi.org/10.1051/alr:2008031>
- Feunteun, E. 2012. *Le rêve de l'anguille. Une sentinelle en danger. Petite encyclopédie sur un poisson extraordinaire*. Buchet-Chastel : Ecologie. 266 pp.
- Hagihara, S., Aoyama, J., Limbong, D., Tsukamoto, K., 2020. Morphological, ecological and physiological characteristics of downstream-migrating and non-migrating Pacific bicolor eels *Anguilla bicolor pacifica*. *Journal of Fish Biology* 97, 1842–1845. <https://doi.org/10.1111/jfb.14528>
- Heisey, P.G., Mathur, D., Phipps, J.L., Avalos, J.C., Hoffman, C.E., Adams, S.W., De-Oliveira, E., 2019. Passage survival of European and American eels at Francis and propeller turbines. *Journal of Fish Biology* 95, 1172–1183. <https://doi.org/10.1111/jfb.14115>
- Hoste, A. 2024. *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 de Doctorat – ED 251. Université Aix-Marseille. 273 pp.
- Hoste, A., Bouchard, C., Poggiale, J.-C., Nicolas, D., n.d. European eel (*Anguilla anguilla*) survival modeling based on a 22-year capture-mark-recapture survey of a Mediterranean subpopulation. *Journal of Fish Biology* n/a. <https://doi.org/10.1111/jfb.15939>
- Jansen, H.M., Winter, H.V., Bruijs, M.C.M., Polman, H.J.G., 2007. Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. *ICES Journal of Marine Science* 64, 1437–1443. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm132>

- Kjærås, H., Baktoft, H., Silva, A.T., Gjelland, K.Ø., Økland, F., Forseth, T., Szabó-Mészáros, M., Calles, O., 2023. Three-dimensional migratory behaviour of European silver eels (*Anguilla anguilla*) approaching a hydropower plant. *Journal of Fish Biology* 102, 465–478. <https://doi.org/10.1111/jfb.15278>
- Lenihan, E.S., McCarthy, T.K., Lawton, C., 2019. Use of an acoustic camera to monitor seaward migrating silver-phase eels (*Anguilla anguilla*) in a regulated river. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 19, 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.07.001>
- Liermann, C.R., Nilsson, C., Robertson, J., Ng, R.Y., 2012. Implications of Dam Obstruction for Global Freshwater Fish Diversity. *BioScience* 62, 539–548. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.5>
- Marohn, L., Prigge, E., Hanel, R., 2014. Escapement success of silver eels from a German river system is low compared to management-based estimates. *Freshwater Biology* 59, 64–72. <https://doi.org/10.1111/fwb.12246>
- Matley, J.K., Klinard, N.V., Jaine, F.R.A., Lennox, R.J., Koopman, N., Reubens, J.T., Harcourt, R.G., Cooke, S.J., Huveneers, C., 2024. Long-term effects of tagging fishes with electronic tracking devices. *Fish and Fisheries* n/a. <https://doi.org/10.1111/faf.12861>
- Monteiro, R.M., Domingos, I., Almeida, P.R., Costa, J.L., Alexandre, C.M., Quintella, B.R., 2020. Migration and escapement of silver eel males, *Anguilla anguilla*, from a southwestern European river. *Ecology of Freshwater Fish* 29, 679–692. <https://doi.org/10.1111/eff.12545>
- Motyka, R., Watz, J., Aldvén, D., Carlsson, N., Eissenhauer, F., Harbicht, A., Karathanou, E., Knieps, T., Lind, L., Calles, O., 2024. Downstream passage performance of silver eel at an angled rack: effects of behavior and morphology. *Hydrobiologia* 851, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10750-024-05530-5>
- Naismith, I.A., Knights, B., 1988. Migrations of elvers and juvenile European eels, *Anguilla anguilla* L., in the River Thames. *Journal of Fish Biology* 33, 161–175. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1988.tb05570.x>
- Nyqvist, D., Greenberg, L.A., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Ardren, W.R., Castro-Santos, T., 2017. Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater Fish* 26, 707–718. <https://doi.org/10.1111/eff.12318>
- Okland, F., Havn, T.B., Thorstad, E.B., Heermann, L., Saether, S.A., Tambets, M., Teichert, M.A.K., Borcharding, J., 2019. Mortality of downstream migrating European eel at power stations can be low when turbine mortality is eliminated by protection measures and safe bypass routes are available. *Int. Rev. Hydrobiol.* 104, 68–79. <https://doi.org/10.1002/iroh.201801975>
- Palstra, A.P., Guerrero, M.A., Laak, G. de, Breteler, J.P.G.K., Thillart, G.E.E.J.M. van den, 2011. Temporal progression in migratory status and sexual maturation in European silver eels during downstream migration. *Fish Physiol Biochem* 37, 285–296. <https://doi.org/10.1007/s10695-011-9496-x>
- Pedersen, M.L., Jepsen, N., Aarestrup, K., Koed, A., Pedersen, S., Okland, F., 2012. Loss of European silver eel passing a hydropower station. *Applied Ichthyology* 28, 189–193.
- Pella, H., Capra, H., Bergé, J., Lamouroux, N., McNeil, E., Oriol, E., 2011. Designing installations of fixed and mobile telemetry systems in a large river to estimate accuracy of fish positioning. Poster for the AFS Symposium, Seattle, September 2011.

- Piper, A.T., Svendsen, J.C., Wright, R.M., Kemp, P.S., 2017. Movement patterns of seaward migrating European eel (*Anguilla anguilla*) at a complex of riverine barriers: implications for conservation. *Ecol Freshw Fish* 26, 87–98. <https://doi.org/10.1111/eff.12257>
- Piper, A.T., White, P.R., Wright, R.M., Leighton, T.G., Kemp, P.S., 2019. Response of seaward-migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to an infrasound deterrent. *Ecological Engineering* 127, 480–486. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.001>
- Righton, D., Westerberg, H., Feunteun, E., Økland, F., Gargan, P., Amilhat, E., Metcalfe, J., Lobon-Cervia, J., Sjöberg, N., Simon, J., Acou, A., Vedor, M., Walker, A., Trancart, T., Brämick, U., Aarestrup, K., 2016. Empirical observations of the spawning migration of European eels: The long and dangerous road to the Sargasso Sea. *Science Advances* 2, e1501694. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501694>
- Russon, I.J., Kemp, P.S., 2011. Advancing provision of multi-species fish passage: Behaviour of adult European eel (*Anguilla anguilla*) and brown trout (*Salmo trutta*) in response to accelerating flow. *Ecological Engineering* 37, 2018–2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.005>
- Simon, J., 2015. Age and growth of European eels (*Anguilla anguilla*) in the Elbe River system in Germany. *Fisheries Research* 164, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.12.005>
- Stein F., Doering-Arjes P., Fladung E., Brämick U., Bendall B., Schröder B., 2015. Downstream Migration of the European Eel (*Anguilla Anguilla*) in the Elbe River, Germany: Movement Patterns and the Potential Impact of Environmental Factors. *River Research and Applications* 32, 666–676. <https://doi.org/10.1002/rra.2881>
- Teichert, N., Tetard, S., Trancart, T., Feunteun, E., Acou, A., de Oliveira, E., 2020. Resolving the trade-off between silver eel escapement and hydropower generation with simple decision rules for turbine shutdown. *J. Environ. Manage.* 261, 110212. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110212>
- Thorstad, E.B., Økland, F., Westerberg, H., Aarestrup, K., Metcalfe, J.D., Thorstad, E.B., Økland, F., Westerberg, H., Aarestrup, K., Metcalfe, J.D., 2013. Evaluation of surgical implantation of electronic tags in European eel and effects of different suture materials. *Mar. Freshwater Res.* 64, 324–331. <https://doi.org/10.1071/MF12217>
- Trancart, T., Carpentier, A., Acou, A., Charrier, F., Mazel, V., Danet, V., Feunteun, E., 2020a. When “safe” dams kill: Analyzing combination of impacts of overflow dams on the migration of silver eels. *Ecol. Eng.* 145, 105741. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105741>
- Trancart, T., Carpentier, A., Acou, A., Danet, V., Elliott, S., Feunteun, É., 2020b. Behaviour of endangered European eels in proximity to a dam during downstream migration: Novel insights using high accuracy 3D acoustic telemetry. *Ecology of Freshwater Fish* 29, 266–279. <https://doi.org/10.1111/eff.12512>
- Trancart, T., Feunteun, E., Danet, V., Carpentier, A., Mazel, V., Charrier, F., Druet, M., Acou, A., 2018. Migration behaviour and escapement of European silver eels from a large lake and wetland system subject to water level management (Grand-Lieu Lake, France): New insights from regulated acoustic telemetry data. *Ecology of Freshwater Fish* 27, 570–579. <https://doi.org/10.1111/eff.12371>
- Trancart, T., Tétard, S., Acou, A., Feunteun, E., Schaeffer, F., de Oliveira, E., 2018. Silver eel downstream migration in the River Rhine, route choice, and its impacts on escapement: A 6-year telemetry study in a highly anthropized system. *Ecological Engineering* 123, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.09.002>

- Travade, F., Larinier, M., Subra, S., Gomes, P., De-Oliveira, E., 2010. Behaviour and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration. *Knowl. Managt. Aquatic Ecosyst.* 01. <https://doi.org/10.1051/kmae/2010022>
- Verbiest, H., Breukelaar, A., Ovidio, M., Philippart, J.-C., Belpaire, C., 2012. Escapement success and patterns of downstream migration of female silver eel *Anguilla anguilla* in the River Meuse. *Ecology of Freshwater Fish* 21, 395–403. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2012.00559.x>
- Verhelst, P., Baeyens, R., Reubens, J., Benitez, J.-P., Coeck, J., Goethals, P., Ovidio, M., Vergeynst, J., Moens, T., Mouton, A., 2018a. European silver eel (*Anguilla anguilla* L.) migration behaviour in a highly regulated shipping canal. *Fisheries Research* 206, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.05.013>
- Verhelst, P., Bruneel, S., Reubens, J., Coeck, J., Goethals, P., Oldoni, D., Moens, T., Mouton, A., 2018b. Selective tidal stream transport in silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) – Migration behaviour in a dynamic estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 213, 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.025>
- Verhelst, P., Buysse, D., Reubens, J., Pauwels, I., Aelterman, B., Van Hoey, S., Goethals, P., Coeck, J., Moens, T., Mouton, A., 2018c. Downstream migration of European eel (*Anguilla anguilla* L.) in an anthropogenically regulated freshwater system: Implications for management. *Fisheries Research* 199, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.10.018>
- Verhelst, P., Reubens, J., Pauwels, I., Buysse, D., Aelterman, B., Van Hoey, S., Goethals, P., Moens, T., Coeck, J., Mouton, A., 2017. Movement behaviour of large female yellow European eel (*Anguilla anguilla* L.) in a freshwater polder area. *Ecology of Freshwater Fish* 27, 471–480. <https://doi.org/10.1111/eff.12362>
- Winter, H.V., Jansen, H.M., Adam, B., Schwevers, U., 2005. Behavioural effects of surgically implanting transponders in Europe eel, *Anguilla anguilla*. *Aquatic telemetry: advances and applications*, Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe. Ustica, Italy 9-13 June 2003 287–295.
- Wright, R.M., Piper, A.T., Aarestrup, K., Azevedo, J.M.N., Cowan, G., Don, A., Gollock, M., Rodriguez Ramallo, S., Velterop, R., Walker, A., Westerberg, H., Righton, D., 2022. First direct evidence of adult European eels migrating to their breeding place in the Sargasso Sea. *Sci Rep* 12, 15362. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19248-8>

12- Quelques Rapports Scientifiques

Acou, A., Boisneau, C., Feunteun, E. 2009. Prédiction des pics de dévalaison des anguilles argentées à partir des données environnementales : état des connaissances et développement d'un modèle opérationnel sur la Loire pour la gestion du turbinage. [Rapport final. 125 pp.](#)

Baran, P., Basilico, L. Larinier, M., Rigaud, C., Travade, F. 2012. Plan de sauvegarde de l'anguille. Quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages ? Séminaire du programme R&D Anguilles-Ouvrages. 28 et 29 novembre 2011, Paris. [158 pp.](#)

Bau, F., Gomes, P., Baran, P., Drouineau, H., Larinier, M., Alric, A., Travade, F., De Oliveira, E., 2013. Anguille et Ouvrages : migration de dévalaison. Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le Gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2010). Rapport de Synthèse, 86 pp.

Beguïn, J., Favriou, P., Sonny, D., 2021. Suivi de la dévalaison des anguilles sur la seine et détermination des voies de passages au droit du complexe hydroélectrique de poses Année 2 (2020-2021). Rapport d'étude pour Hydrowatt, 75 pp.

Boulanger, C., Drouineau, H., Lambert, P., Prévost, E., Acou, A., Beaulaton, L., André, G. 2023. Estimations des possibilités de captures totales d'anguilles de moins de 12 cm pour la saison 2023-2024. Avis du Comité Scientifique, 24 pp. - <https://hal.inrae.fr/hal-04229038v1>

Briand, C., Chapon, P.-M., Beaulaton, L., Drouineau, H., Lambert, P. 2018. Eel density analysis (EDA 2.2.1). Escapement of silver eels (*Anguilla anguilla*) from French rivers. [2018 report. 91 pp.](#)

Briand, C., Mateo, M., Drouineau, H., Korta., M., Díaz, E., Beaulaton, L. 2022. Eel Density Analysis (EDA 2.3). Escapement of silver eels (*Anguilla anguilla*) from French, Spanish and Portuguese rivers. [GT4 - deliverable E4.1.1. 123 pp.](#)

Campton, P., Abdallah, Y., Lebel, I., 2013. Caractérisation de la dévalaison des anguilles argentées en Rhône-Méditerranée. Synthèse des investigations déployées en France et à l'étranger., Association Migrateurs Rhône-Méditerranée, 77 pp.

CNR & Normandeau Associates, Inc. 2011. Evaluation des taux de survie et de blessures des anguilles passant a travers une turbine de grande taille à la centrale hydroelectrique de beaucaire sur le Rhône. [Rapport final. 39pp.](#)

Commission Staff Working Document Evaluation of Council Regulation (EC). 2020. No 1100/2007 establishing measures for the recovery of the stock of European eel. SWD(2020) 36 final. [103 pp.](#)
Plan de Gestion Anguille de la france. 2007 – [volet national. 115 pp.](#)

De Oliveira, E. 2012. Etude des rythmes migratoires de l'anguille argentée (*Anguilla anguilla*) et des voies de franchissement des aménagements hydrauliques sur le Rhin. Rapport EDF H-P76-2011-00324-FR. 60 pp.

Drouineau, H., Lambert, P., Acou, A., Beaulaton, L., Boulenger, C. 2022. Estimations des possibilités de captures totales d'anguilles de moins de 12 cm pour la saison 2022-2023. 26 pp.

ICES. 2022. Joint EIFAAC/ICES/GFCM Working Group on Eels (WGEEL). ICES Scientific Reports. 4:62. 297 pp. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.20418840>

Lerquet, M., Beguin, J., Colson, D., Sonny, D. 2020. Rapport de suivi telemetrique des anguilles argentees durant la phase de test pilote de mesures de protection sur les sites hydroelectriques de luminus. Life4Fish. [LIFE16 NAT/BE/000807. 64 pp.](#)

Normandeau Associates Inc & Gomez and Sullivan Engineers, 2011. Study to monitor movement of telemetered silver american eel downstream of Conowingo dam RSP 3.3. Report for Exelon. 50 pp.

Plan de Gestion Anguille France. 2024. Rapport de mise en œuvre – juin 2024 ; Article 9 du R (CE) n°1100/2007. 186 pp. [A télécharger ici.](#)

Rigaud, C. 2011. Anguille en milieux profonds. Etat des connaissances et perspectives. Rapport final 2010. 53 pp.

