



HAL
open science

Étude du comportement des smolts de saumons atlantiques (*Salmo salar*) au droit de la retenue de Poutès (Allier) à l'aide de la télémétrie 2D

Marine Lemaire

► **To cite this version:**

Marine Lemaire. Étude du comportement des smolts de saumons atlantiques (*Salmo salar*) au droit de la retenue de Poutès (Allier) à l'aide de la télémétrie 2D. Sciences du Vivant [q-bio]. 2015. dumas-01256599

HAL Id: dumas-01256599

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01256599>

Submitted on 15 Jan 2016

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.

AGROCAMPUS OUEST

CFR Angers CFR Rennes



Année universitaire : 2014-2015

Spécialité : Ingénieur Agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :
Halieutique option Ressources et
Ecosystèmes Aquatiques

Mémoire de Fin d'Études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Etude du comportement des smolts de saumons atlantiques (*Salmo salar*) au droit de la retenue de Poutès (Allier) à l'aide de la télémétrie 2D

Par : Marine LEMAIRE



Barrage de Poutès, Mars 2015, Marine Lemaire

Soutenu à Rennes le 10 septembre 2015

Devant le jury composé de :

Président : Dominique OMBREDANE

Maître de stage : Stéphane TETARD

Enseignant référent : Dominique OMBREDANE, Elodie REVEILLAC

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Laurent BEAULATON (ONEMA, Rennes)

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage Stéphane TETARD pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien ainsi que Eric DE OLIVEIRA pour ses conseils et ses idées.

Merci à l'équipe du Laboratoire National d'Hydraulique & Environnement du pôle Recherche et Développement de EDF pour leur accueil.

J'aimerais aussi remercier toutes les personnes qui ont participé à la partie terrain au moment de la mise en place et du retrait du matériel : des personnes du CNSS, de l'ONEMA, ainsi que Mathieu Le Brun et Véronique Landrault de l'Equipe Mesure en Milieu Naturel d'EDF. Un grand merci au CNSS qui a aussi réalisé le marquage des saumons sur le terrain au cours des mois de mars et d'avril.

Un grand merci à tous les stagiaires que j'ai rencontré pendant ce stage, pour leur enthousiasme leur aide et nos échanges.

Merci à mes enseignants encadrants Dominique OMBREDANE et Elodie REVEILLAC.

ABREVIATIONS

AMT : Acoustic Micro Transmitter

BCPA : Behavioral Change Point Analysis

CNSS : Conservatoire National du Saumon Sauvage

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

EDF : Electricité De France

JSAT : Juvenile Salmon Atlantic Telemetry

GIP : Groupe d'Intérêt Public

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

LOGRAMI : LOire GRAnds MIgrateurs

ONG : Organisation Non Gouvernementale

ONEMA : Office Nationale de l'Eau et des Milieux aquatiques

TCC : Tronçon Court-Circuité

UTM : Universal Transverse Mercator

Table des matières

I. Introduction.....	1
II. Mise en contexte.....	1
A. Saumon atlantique.....	1
B. Zone d'étude : l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol.....	3
1. Situation sur l'Allier – enjeux pour le saumon.....	3
2. Aménagement hydroélectrique.....	4
3. Projet de reconfiguration.....	5
C. La problématique de la dévalaison des smolts au niveau de Poutès.....	6
1. La dévalaison des smolts : un phénomène complexe et régulé.....	6
2. Mise en évidence d'incohérences entre des observations récentes.....	7
3. Quel est le comportement des smolts une fois dans la retenue ?.....	8
III. Matériel et méthode.....	8
A. Zone d'étude et gestion du barrage sur la période d'étude.....	8
B. Matériel de télémétrie acoustique.....	9
1. La télémétrie acoustique 2D.....	9
2. Matériel acoustique.....	9
C. Sites d'installation.....	10
D. Capture – Marquage.....	11
E. Collecte, traitement des données et analyse des résultats.....	12
1. Récupération de données.....	12
2. Analyse 1D.....	12
3. Analyse 2D.....	13
IV. Résultats.....	14
A. Comment s'effectue le transit des smolts dans la zone de Poutès ?.....	14
1. Quels facteurs environnementaux influencent le départ en migration ?.....	14
2. Taux de présence et taux de transfert sur la zone d'étude.....	15
3. Temps de transit et de temps de résidence dans la retenue.....	16
4. Profils et comportement à l'abord de la retenue.....	17
5. Les devenir des smolts.....	21
B. Comportement dans la zone du barrage.....	22
1. Les données de positionnement : un compromis entre précision et conservation des données.....	22
2. Les zones de présence dans la retenue.....	25
3. Etude des tentatives dans la zone du barrage.....	26
4. Influence de la saison.....	27

V. Discussion / Perspectives.....	30
A. Méthodologie et matériel utilisé.....	30
1. Taux de positionnement.....	30
2. Impact du marquage et taux de détection des smolts marqués.....	30
3. Le calcul de U-Map.....	31
B. Une saisonnalité dans l'activité des smolts perceptible dans l'initiation de la migration et différentes échelles spatiales	31
C. Un retard conséquent au niveau de la retenue de Poutès.....	33
D. Comportement dans la zone du barrage et sortie de la retenue.....	34
E. Le devenir des smolts	35
VI. Conclusion	36
VII. Bibliographie.....	36
VIII. Sitographie	38

Table des annexes :

<u>Annexe I</u> :	Evolution des rivières à saumons en France du XVIII ^{ème} siècle à nos jours
<u>Annexe II</u> :	Evolution de nombre de smolts comptés au barrage de Poutès
<u>Annexe III</u> :	Photographies extraites de la vidéosurveillance de l'exutoire du barrage de Poutès : un bécard et des smolts
<u>Annexe IV</u> :	Nombre de smolts comptés à l'exutoire du barrage de Poutès et aux tambours en 2013
<u>Annexe V</u> :	Fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D
<u>Annexe VI</u> :	Tableau récapitulatif des smolts utilisés et de leur date de lâcher
<u>Annexe VII</u> :	Profils migratoires des smolts par classe
<u>Annexe VIII</u> :	Erreur et taux de positionnement : une étape préliminaire nécessaire à l'analyse
<u>Annexe IX</u> :	Représentation des 100 dernières détections des smolts non détectés dans le TCC dont la dernière détection est dans la zone de la retenue avec le package adehabitatLT de R
<u>Annexe X</u> :	Nombre de données dans la zone du barrage pour chaque smolt avec toutes les DOP, les $DOP \leq 0,4$ et les $DOP \leq 0,3$ avec les pourcentages associés
<u>Annexe XI</u> :	Histogrammes des $DOP \leq 1$ par smolt
<u>Annexe XII</u> :	Cartes des positions de deux smolts pour les $DOP \leq 0,3$ et les $DOP \leq 0,4$
<u>Annexe XIII</u> :	Sortie de la fonction kernel du package adehabitatHR de R par smolt, paramètre de lissage de référence
<u>Annexe XIV</u> :	Première exploitation du package BCPA de R en utilisant la vitesse persistante

Tables des figures

Figure 1: Cycle de vie du saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>)	2
Figure 2: Le complexe Loire-Allier.....	3
Figure 3: Schéma de fonctionnement du complexe hydro-électrique de Poutès-Monistrol.....	4
Figure 4: Vue aérienne du barrage de Poutès	5
Figure 5: Dispositifs de franchissement du barrage	5
Figure 6: Reconfiguration du barrage.....	6
Figure 7: Hydrophone WHS 4000	9
Figure 8: Emetteur JSAT AMT	9
Figure 9: Positions des hydrophones le long de l'axe du site d'étude.....	10
Figure 10: Montage des hydrophones au corps mort	11
Figure 11: Tambour rotatif à Alleyras	11
Figure 12: Histogrammes des tailles et des poids des smolts utilisés	12
Figure 13: Nombre de smolts détectés à Alleyras et évolution de la température et du débit à Alleyras.....	14
Figure 14: Durée entre la zone de lâcher et les stations d'Alleyras, de la retenue et du TCC.....	16
Figure 15: Temps de transit entre Alleyras et la Queue de retenue et entre le barrage et le TCC...	16
Figure 16: Temps de résidence dans toute la retenue	17
Figure 17: Profil migratoire du smolt 40795 avec les différentes stations d'enregistrement	18
Figure 18: Histogramme des différences de temps comprises entre 1 et 60 min.....	18
Figure 19: Profil du smolt 14489	19
Figure 20: Profil du smolt 40305	19
Figure 21: Profil du smolt 62649	19
Figure 22: Profil du smolt 27722	20
Figure 23: Profil du smolt 29801	20
Figure 24: Profil du smolt 8257	20
Figure 25: Histogrammes du nombre d'allers-retours jusqu'à la queue de retenue	21
Figure 26: Les 100 dernières détections du smolt 8944.....	22
Figure 29: Positions conservées pour le poisson 42 395 aux DOP $\leq 0,3$ et $0,4$	23
Figure 27: Pourcentage de données conservées en fonction de la DOP	23
Figure 28: Histogramme des DOP inférieures à 1	23
Figure 30: Carte de la DOP moyenne par pixel pour toutes les positions.....	24
Figure 31: Nombre d'hydrophones qui détectent une position en moyenne par pixel.....	24
Figure 32: Emprise des hydrophones dans la retenue	24
Figure 33: Trajectoire du smolt 30994 (402 positions).....	25
Figure 34: Pourcentage de smolts détectés par pixel (sur les 91 smolts présents au barrage)	25
Figure 35: Représentations de la fonction d'utilisation de l'espace pour les 6 classes de smolts définies dans la partie III-A-4.	26
Figure 36: Histogrammes du nombre de tentatives	26
Figure 37: Histogramme de la durée des tentatives	27

Figure 38: Histogramme des durées entre les tentatives	27
Figure 39: Histogramme des dates de détection dans le TCC	28
Figure 40: Exploitation de la zone du barrage en fonction des 4 périodes définies	28
Figure 41: Boîtes à moustaches des temps de résidence dans la retenue en fonction de la date d'entrée dans la retenue	28
Figure 42: Boîtes à moustache de la durée d'une tentative en fonction de la période	29
Figure 43: Histogramme de la fréquence des tentatives en fonction de la période de la journée et de la période de la saison	30

Table des tableaux :

Tableau 1: Coût matériel du suivi.....	10
Tableau 2: Nombres de smolts marqués détectés aux différentes stations après exploitation des données avec U-Map puis avec HOST	15
Tableau 3: Taux de transfert entre les stations de l'axe d'étude	15
Tableau 4: Tableau récapitulatif des distances, des taux, temps et des vitesses de transfert entre les stations.....	17
Tableau 5: Nombre de smolts dans chaque classe et pourcentage de smolts détectés dans le TCC par classe	21
Tableau 6: Dénombrement des smolts suivant leur zone de détection de la dernière position	22
Tableau 7: Pourcentage de la différence du nombre de données pour une DOP $\leq 0,3$ et une DOP $\leq 0,4$	23
Tableau 8: Nombre et pourcentage de smolts présents au tambour et dans le TCC.....	27
Tableau 9: Nombre et pourcentage de tentatives totales et réussies par période en fonction de la date d'initiation de la migration.....	29

I. Introduction

EDF possède de nombreux aménagements hydroélectriques le long des cours d'eau français. Ces aménagements sont en étroite relation avec les poissons migrateurs, notamment le saumon atlantique (*Salmo salar*). En effet, ces ruptures de connectivité sont connues pour être l'une des causes majeures de la raréfaction des poissons migrateurs. C'est pourquoi des études sont depuis longtemps réalisées pour connaître l'impact des aménagements et de les limiter.

L'axe Loire-Allier est aujourd'hui l'un des derniers axes de migration pour le saumon atlantique en France, mais aussi le plus grand axe de migration du saumon atlantique à l'échelle européenne. En 1941, la construction du complexe hydroélectrique de Poutès Monistrol (comprenant le barrage de Poutès) a réduit d'un tiers la zone de reproduction accessible aux saumons atlantiques sur la rivière Allier. Depuis 1983, le barrage de Poutès a été et continue d'être aménagé pour permettre le passage des poissons et ouvrir à nouveau les zones de frayères en amont du barrage à l'aide de dispositifs de montaison et de dévalaison. Toutefois, ces dispositifs n'améliorent pas suffisamment le passage des poissons. C'est pourquoi le barrage de Poutès a été longtemps la scène de nombreux conflits entre les partis prenants (EDF, ONG, scientifiques...). Les études sur la migration des saumons au niveau du barrage de Poutès montrent qu'il a un impact sur le passage des saumons dans les deux sens de la migration. La concession de ce barrage prenant fin en 2007, il a été décidé après de nombreuses discussions qu'il serait reconfiguré pour concilier exploitation de la ressource en eau et exigences de la continuité écologique. Les travaux de reconfiguration sont prévus de 2016 à 2019. La reconfiguration permettra, entre autres, de diminuer la hauteur du barrage (de 18 m à 4 m de haut) et la longueur du réservoir (de 3 500 m à 350 m de long).

Cette étude, financée par EDF UP Centre et l'Agence de l'eau Loire Bretagne, a pour objectif de suivre la dévalaison des smolts sur un tronçon d'Allier incluant le barrage de Poutès en utilisant une technique innovante de télémétrie acoustique 2D. Ce suivi permet de constituer un état initial qui servira de base pour mesurer les gains écologiques réalisés suite à sa reconfiguration. Ces questionnements portent notamment sur le comportement des smolts dans la retenue et au droit de l'exutoire.

Pour répondre à cette problématique les smolts sont donc suivis par télémétrie acoustique au moyen d'émetteurs insérés dans des smolts sauvages et de récepteurs placés en des points clés de la zone : en amont, dans et en aval de la retenue. Au niveau de l'ouvrage, les smolts sont suivis par télémétrie acoustique 2D.

La première partie du mémoire présente une brève synthèse de la biologie du saumon atlantique en se focalisant sur la migration de dévalaison et de l'historique du barrage et des problématiques qui lui sont associées. La suite du mémoire traite des analyses de données réalisées avec les données obtenues par le suivi de 2015. La deuxième partie présente le matériel utilisé et sa mise en place sur le terrain ainsi que les méthodes d'analyses adoptées. La troisième partie présente les résultats des analyses du comportement des smolts sur la zone d'étude et dans la retenue. La dernière partie consiste en une discussion des résultats obtenus et une comparaison avec les résultats de la littérature.

II. Mise en contexte

A. Saumon atlantique

Les espèces diadromes déclinent partout dans le monde (Limburg & Waldman, 2009). Le saumon atlantique (*Salmo salar*, Linnaeus 1758), espèce anadrome de la famille des salmonidés, ne fait pas exception à ce phénomène (annexe I). Il est d'ailleurs classé comme « espèce vulnérable » sur la liste rouge des espèces menacées de l'IUCN. Il est inquiétant de noter que les populations de saumons déclinent, voire ont disparu dans la plupart des rivières européennes de nos jours (Imbert et al., 2013). Le saumon de l'Allier constitue la « dernière population de saumons de grande migration de toute l'Europe de l'Ouest » (Rivernet). Il fait partie du patrimoine naturel et

paysager de la rivière Allier, exceptionnelle à l'échelle européenne (Loire nature). En effet, au début du XVIII^{ème} siècle, plus de 100 000 saumons se présentaient tous les ans à l'estuaire de la Loire (Cohendet, 1993). De 1928 à 1975, les captures totales ont décliné continuellement : elles sont passées de 15 000 à moins de 1 000 saumons par an (Cohendet, 1993).

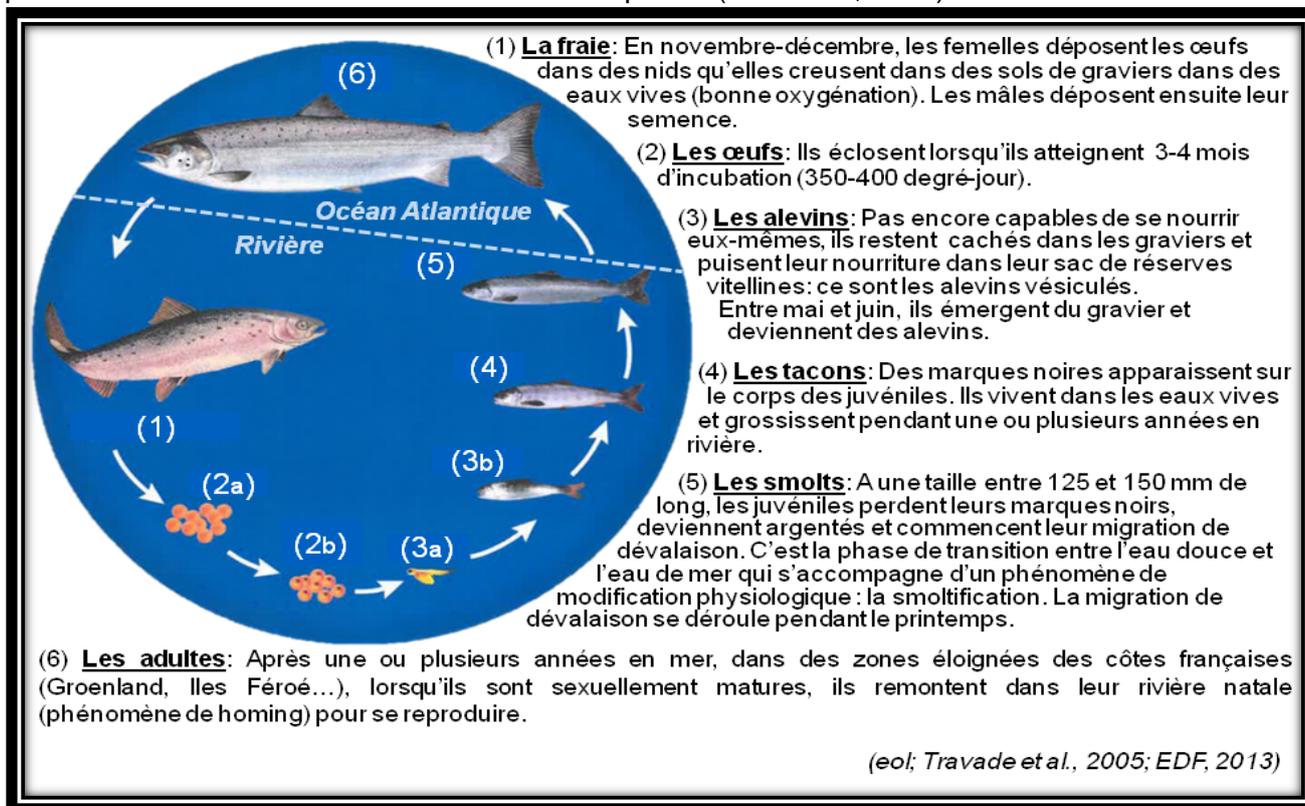


Figure 1: Cycle de vie du saumon atlantique (*Salmo salar*)

Chez les poissons migrateurs la réalisation du cycle de vie est cruciale (Figure 1) et aujourd'hui elle est bien souvent perturbée du fait de la présence d'obstacles le long des axes aquatiques mais aussi de la dégradation générale du milieu (pollution, extraction de gravats...), d'une pression de pêche trop importante, du bouchon vaseux estuarien ainsi que du changement climatique. Dans certains cours d'eau, faute de libre circulation, les populations de saumons atlantiques ont disparues (Travade et al., 2005). Pour les espèces migratrices anadromes, les problèmes de migration le long des cours d'eau se posent deux fois : à la montaison et à la dévalaison. A la montaison, le problème qui se pose principalement est lié au fait que les obstacles entravent la remontée des adultes vers les frayères voire les meilleures frayères (EDF, 2013). Les problèmes liés à la dévalaison portent sur la mortalité des animaux due au passage au travers de turbines ou des prises d'eau (Larinier & Travade, 2002) ainsi que les retards engendrés par les retenues (Imbert et al., 2013).

Partant du constat de dégradation des populations indigènes mais aussi de la dégradation des habitats, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000 énonce le concept de continuité écologique qui va permettre la protection des espèces et des milieux aquatiques. Elle est définie comme « la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables [...], le bon déroulement du transport naturel des sédiments ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs biologiques [...] » (article FR214-109 du code de l'environnement définissant un obstacle à la continuité écologique). De plus, la DCE demandait aux pays membres de l'Union Européenne de s'engager à rétablir un « bon état » des cours d'eau (chimique et écologique) d'ici 2015 (ONEMA, 2010). La gestion des ouvrages est entourée d'un cadre réglementaire français et européen important (DCE, LEMA, loi Grenelle...).

Le saumon atlantique est très protégé à cause de sa très forte vulnérabilité. Par conséquent, afin de permettre aux populations de saumons atlantiques de se reformer et de restaurer leurs habitats

de reproduction et de grossissement, des plans de gestion ont été mis en place. Ces plans ont donné lieu à des programmes de soutien des populations (création de la salmoniculture de Chanteuges suite au Plan Loire Grandeur Nature), des actions scientifiques de connaissances et des actions en faveur de la continuité écologique. De plus, compte tenu de l'évolution de la population de saumons atlantiques sur la Loire, la pêche, professionnelle ou récréative, est interdite depuis 1994 sur le bassin de la Loire (Cohendet, 1993).

B. Zone d'étude : l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol

1. Situation sur l'Allier – enjeux pour le saumon

Avec ses 1 012 km de long, la Loire est le plus long fleuve de France. Son bassin versant représente 1/5 de la surface de la France métropolitaine (Encyclopedia Universalis). L'Allier est son principal affluent, leur point de confluence se trouve au niveau du Bec d'Allier, à côté de Nevers (Figure 2). Il prend naissance à 1 485 m d'altitude en Lozère au pied de la Moure de la Gardille (Loire nature). Il a une longueur de 425 km, un bassin versant de 14 310 km² et des débits modules de 150 m³.s⁻¹ au niveau de sa confluence avec la Loire (Loire nature). C'est le dernier cours d'eau disposant d'une population « naturelle » sur le bassin (CNSS, 2014) sachant que le repeuplement a largement soutenu les populations jusqu'en 2011. Depuis 2008, la zone en amont de Langeac, devenue une zone refuge, ne reçoit plus de déversements de juvéniles. La production de juvéniles de cette zone est naturelle (CNSS, 2014).



Figure 2: Le complexe Loire-Allier (géoportail)

Le Haut-Allier est la partie de l'affluent qui va de la source jusqu'à Langeac en Haute Loire (43) (Loire nature). Dans cette zone, une vallée très encaissée s'est creusée au fil du temps : ce sont les Gorges de l'Allier, qui voient des eaux torrentielles circuler avec une alternance de plats et de rapides (Loire nature). Après Langeac, les méandres encaissés et les zones d'élargissement se succèdent dans la vallée (Loire nature).

Le complexe de Poutès-Monistrol se situe dans les Gorges de l'Allier, à 890 km de l'estuaire de la Loire et 70 km des sources de l'Allier, au sud de Clermont-Ferrand (Imbert et al., 2013 ; Travade et al., 2005) (Figure 2). La meilleure zone de frayères de l'Allier pour les saumons atlantiques s'étale sur 200 km, de 710 km à 920 km en amont de l'estuaire (Travade et al., 2005). Le barrage de Poutès se situe donc au milieu de cette zone et les zones en amont du barrage représentent 36% du potentiel de production du bassin de l'Allier (Travade et al., 2005), une partie de ces zones ayant été submergées lors de mise en eau. A l'aval des débits relativement faibles dans le tronçon court-circuité peuvent causer des problèmes d'accessibilité.

Afin de réaliser leur cycle de vie, les saumons atlantiques de l'Allier se voient donc contraints de migrer le long de cet axe au moins deux fois au cours de leur vie (migrations de dévalaison à l'état de smolt et de montaison à l'état adulte). Les premiers saumons qui montent l'Allier sont enregistrés à l'automne dans l'estuaire, ils arrêtent leur migration durant les périodes très froides et atteignent leur zone de reproduction l'année suivante (GIP Loire estuaire, 2014). La migration estuarienne peut se poursuivre jusqu'en juin. Sur l'axe Loire-Allier, la dévalaison se déroule entre les mois de mars et de juin (Travade et al., 2005). La distance à parcourir par les smolts peut atteindre plus de

900 km pour les smolts partant de l'amont du barrage de Poutès (Imbert et al., 2013). De plus, sur l'axe de l'Allier, les poissons font face à 14 obstacles à l'aval du barrage de Poutès (seuils et barrages) (EDF, 2013). Ces 14 obstacles sont tous équipés de dispositifs de franchissement plus ou moins efficaces (EDF, 2013).

2. Aménagement hydroélectrique

Construit en 1941, le barrage de Poutès est concédé à EDF en 1956 pour une durée de 50 ans (Rivernet). C'est un barrage de type poids qui court-circuite un tronçon de 10 km d'Allier, appelé le Vieil Allier (Travade et al., 2005) (Figure 3). Une conduite forcée de 90 m de long (Figure 3) est alimentée par une prise d'eau située en rive gauche

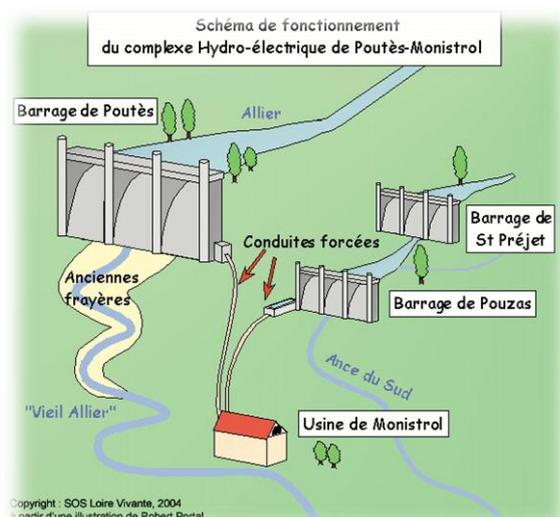


Figure 3: Schéma de fonctionnement du complexe hydro-électrique de Poutès-Monistrol (Rivernet)

l'année (EDF, 2013). Le réservoir, quant à lui, mesure 3,5 km de long avec une capacité totale de 1,716 Mm³ et une surface de 39 ha (EDF, 2013).

La centrale hydroélectrique de Monistrol d'Allier, située en aval (Figure 3), est alimentée en eau par le barrage de Poutès sur l'Allier (55% de l'eau turbinée à l'usine) et deux autres barrages en série sur l'Ance du Sud (Saint Préjet et Pouzas) (EDF, 2013). A l'usine, l'eau provenant du barrage de Poutès est exploitée par trois turbines Francis (Travade et al., 2005). Le débit turbiné est ensuite rejeté en rive gauche de l'Allier dans un canal de fuite qui conflue avec le tronçon court-circuité du Vieil Allier (Travade et al., 2005).

Des dispositifs de franchissement ont été installés au barrage du Poutès pour permettre le passage des saumons à la montaison et à la dévalaison (Figure 4) :

- Pour la montaison, le barrage étant initialement prévu moins haut, une passe à ralentisseurs a été construite en 1941 en rive droite (Figure 4 et 5a)). Toutefois, au cours des travaux, il a été décidé de construire un barrage plus haut, la passe était donc inutilisable. En 1986, lorsqu'un ascenseur est installé et relié à la passe à ralentisseurs par une passe à bassins (EDF, 2013), la montaison devient possible. Cet ascenseur est formé d'une cage de capture équipée d'une nasse anti-retour et fonctionne toute l'année sauf en cas de panne ou lors de l'entretien du barrage (EDF, 2013). Toutes les deux heures, la cage est remontée et vidée mécaniquement à l'amont du barrage par un toboggan hélicoïdal (Figure 5b)).

- En ce qui concerne la dévalaison, le dispositif se trouve en rive gauche du barrage, entre la prise d'eau et l'évacuateur de crue (Travade et al., 2005) (Figure 4). Il s'agissait initialement d'une passe à glaçons et à tacons qui permettait le passage des saumoneaux (Travade et al., 2005). En 1994, un dispositif entièrement dédié au franchissement a été mis en place : un exutoire de surface à cote variable. Il est formé d'un entonnement en amont et d'une glissière à forte pente qui amène les smolts dans le tronçon court-circuité (Travade et al., 2005) (Figure 5a) et 5b)). Le revêtement de l'exutoire est en résine, lisse, afin d'éviter les blessures par abrasion des poissons lors de leur passage. Le débit appliqué dans l'exutoire est de 2,5 m³.s⁻¹. L'exutoire était mis en place tous les ans du 15 mars au 15 juin (Travade et al., 2005). Depuis 2013, en revanche, il est mis en place à

partir du 1^{er} mars. L'efficacité d'un exutoire est définie comme le pourcentage de smolts qui franchissent le barrage en passant par l'exutoire par rapport à la somme du nombre de smolts qui franchissent le barrage par l'exutoire et par la prise d'eau (Bach et al., 2004). L'efficacité du dispositif actuel, mesurée en 2004 par radiopistage, est proche de 90% (Bach et al., 2004).

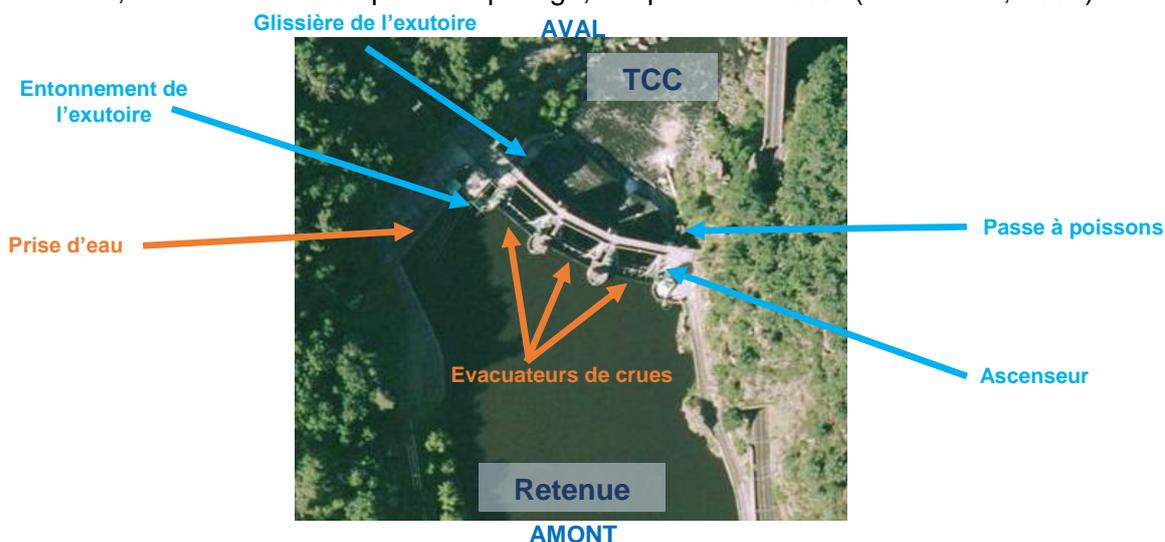
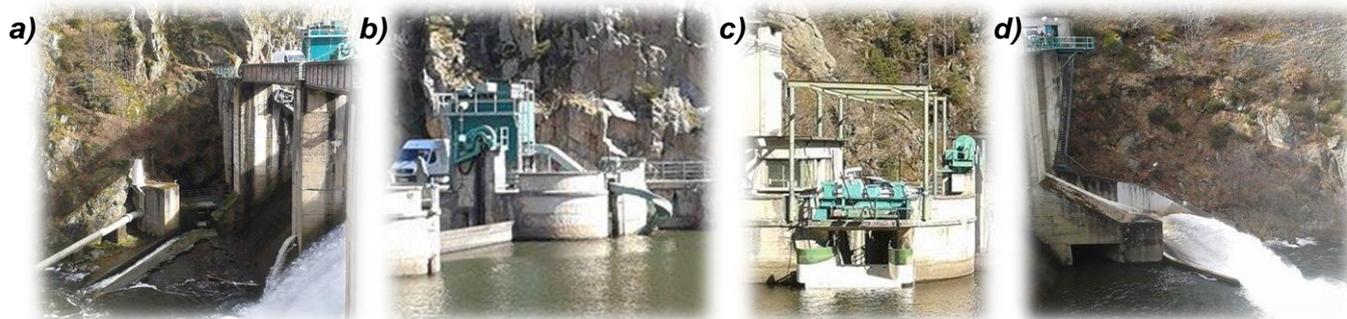


Figure 4: Vue aérienne du barrage de Poutès (géoportail)



Barrage de Poutès, Dispositifs de migration du barrage, Mars 2015, Marine Lemaire

Figure 5: Dispositifs de franchissement du barrage :

- a) Aval : entrée de la passe à ralentisseur ;
- b) Amont : sortie de l'ascenseur et toboggan hélicoïdal ;
- c) Amont : entonnement de l'exutoire de dévalaison ;
- d) Aval : partie terminale de la glissière de dévalaison

La zone de l'entonnement (Figure 5c)) est éclairée par une lampe à vapeur de mercure de puissance 400 W. Depuis 2001, l'entonnement est éclairé toutes les nuits (Bach et al., 2004).

Remarque : Les smolts peuvent emprunter trois voies vers l'aval : l'exutoire, les vannes de déversement lorsqu'elles sont ouvertes (mortalité supposée de 0%) et les turbines (mortalité supposée de 50% avec des turbines Francis, Bach et al., 2004). Une étude de radiopistage réalisée par EDF en 2004 a montré que 90% des smolts franchissant le barrage lors de cette étude passent par l'exutoire et 10% empruntent les turbines (Bach et al., 2004).

3. Projet de reconfiguration

En 2007, la concession d'EDF du barrage de Poutès prenait fin (EDF, 2013). En 2011, après plusieurs années de concertation entre l'Etat, EDF, les élus locaux et les associations de protection de l'environnement, il a été décidé de reconfigurer le barrage de Poutès, pour le rendre compatible avec les exigences de la DCE et de la LEMA tout en maintenant une activité économique intéressante pour la vallée en produisant de l'énergie renouvelable (EDF, 2013 ; Rivernet).



Figure 6: Reconfiguration du barrage (Communication interne) :

a) Nouvelle forme du barrage

b) Comparaison de la nouvelle retenue (bleu clair) et de l'ancienne (bleu foncé)

La reconfiguration du barrage doit suivre un cahier des charges environnemental établi en collaboration avec l'ONEMA (EDF, 2013). Elle consiste en un abaissement jusqu'à 4 m tout en conservant une grande partie de la structure déjà existante (EDF, 2013) (Figure 6 a)). La diminution de la hauteur du barrage permettra d'avoir des dispositifs de franchissement plus performants, notamment pour la montaison : une passe à bassin de 13 bassins remplacera l'enchaînement des trois dispositifs présents actuellement (EDF, 2013). Un débit d'attrait conséquent délivré par un clapet orientera les adultes vers la passe en période de montaison. Le dispositif de dévalaison sera constitué d'une goulotte dans le prolongement de la future prise d'eau avec un débit minimum transitant de $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en période de dévalaison (EDF, 2013). L'alimentation en eau par la conduite actuelle étant conservée, un dispositif de siphon permettra de relever l'eau prélevée. L'aménagement sera effaçable en crue (transparence) et permettra la continuité sédimentaire grâce aux clapets (EDF, 2013). De plus, la nouvelle retenue représentera $1/10^{\text{ème}}$ de la retenue actuelle (de 3500 m à 350 m de long pour un volume de $13\,000 \text{ m}^3$, Figure 6 b)) ce qui permettrait de diminuer le retard des smolts dans la retenue (EDF, 2013). Le barrage fonctionnera en turbinage au fil de l'eau (EDF, 2013).

Bien que toutes les caractéristiques du futur aménagement ne sont pas encore décidées, il devra néanmoins répondre à certains objectifs en termes d'efficacité : en ce qui concerne la dévalaison, 85% des poissons migrateurs devront atteindre le barrage ; parmi les poissons traversant le barrage, au moins 95% doivent passer par la glissière ou les vannes ; il doit y avoir une absence de retard significatif dans la retenue (retard médian inférieur à 5 jours sur les poissons qui franchissent) (EDF, 2013).

L'étude présentée ici permet de compléter la connaissance du comportement des smolts au droit du barrage de Poutès avant sa reconfiguration. Elle s'inscrit aussi dans le Plan Saumon de Loire Allier qui demande que les connaissances sur la population de saumon atlantique soient approfondies, que la restauration des milieux soient accélérée afin de suivre les effets de l'aménagement de Poutès (Carmie, 2012).

C. La problématique de la dévalaison des smolts au niveau de Poutès

1. La dévalaison des smolts : un phénomène complexe et régulé

Sur l'Allier, la migration de dévalaison se déroule de mars à juin (Travade et al., 2005). Une modification du comportement est notable au moment de la transition du stade de tacon au stade de smolt : les tacons ont un comportement territorial et agressif qui s'estompe ce qui permet aux pré-smolts d'adopter un comportement grégaire (Jonsson & Jonsson, 1993 ; Thorpe, 1994). De plus, certains auteurs pensent que la migration des smolts se fait exclusivement passivement avec les courants (Tytler et al., 1978) bien que d'autres auteurs aient montré que les smolts pouvaient nager activement au cours de leur migration (Davidsen et al., 2005).

Tous les mécanismes environnementaux influençant le départ en migration ne sont actuellement pas bien compris et ce doit être la synergie de multiples facteurs qui enclenche le départ en migration. Toutefois, il a été montré que, parmi ces facteurs environnementaux, la température (Martin, et al., 2011) et le débit (Enders et al., 2012) jouent un rôle essentiel dans le départ en migration.

Au cours de la migration de dévalaison, le timing d'entrée dans l'océan est vital car il permet ou non un taux de survie correct (McCormick et al., 1998). Il est déterminé par deux fenêtres temporelles qui doivent être synchrones pour que l'acclimatation se fasse avec succès :

- La fenêtre physiologique : Cette fenêtre correspond à une période limitée à quelques semaines (McCormick et al., 1998) où les smolts sont en bonne condition physiologique pour changer de milieu de vie et entrer dans l'océan avec succès.

- La fenêtre environnementale : Cette fenêtre correspond à une période où les conditions environnementales sont le plus favorables à l'entrée des smolts en mer (température, O₂ dissous, prédation, pollution...). Par exemple, pour des températures inférieures à 4°C et supérieures à 17°C, la vitesse de migration de dévalaison des smolts est ralentie de 80% (Martin, et al., 2011).

Une entrée en estuaire des smolts en dehors de ces fenêtres temporelles aurait des conséquences sur leur survie (Hansen & Jonsson, 1989) et sur ses capacités à s'imprégner de la localisation de sa rivière natale pour le phénomène de homing (Hansen & Jonsson, 1991).

2. Mise en évidence d'incohérences entre des observations récentes

Depuis 1999, un suivi par vidéosurveillance de l'exutoire du barrage de Poutès est réalisé par LOGRAMI (LOire GRAnd MIGrateurs) afin d'avoir une idée du nombre de smolts qui empruntent l'exutoire chaque année (annexe II) mais également d'avoir une connaissance de la cinétique de dévalaison. Un exemple des images observées à la vidéosurveillance est présenté en annexe III. Ce suivi a montré que les pics de passage à Poutès se déroulent de début avril à fin mai et qu'avant avril, les passages au niveau de l'exutoire sont très peu nombreux.

En 2013 et 2014, une étude a été réalisée pour suivre la dévalaison des smolts dans le Haut-Allier. Deux tambours rotatifs ont été placés en amont et en aval du barrage de Poutès afin de piéger les poissons qui dévalaient. La station de piégeage en amont a été mise en place afin de capter le signal naturel de la dévalaison, tout en s'affranchissant de l'effet du barrage. Elle se situe à moins de 500 m en amont de la queue de retenue (CNSS, 2014). Les nombres de smolts comptés aux tambours et à l'exutoire par vidéosurveillance en 2013 sont présentés en annexe IV. En amont du barrage, à Alleyras, une dévalaison unique et généralisée a été observée en 2013 et 2014. En 2013, à la faveur d'une hydrologie soutenue, un pic d'individus est enregistré au tambour d'Alleyras dès la première semaine de mars (CNSS, 2013). En 2014, ce pic se produit aux alentours du 23-24 mars en lien avec une hydrologie relativement faible sur toute la période de dévalaison (CNSS, 2014). Les passages deviennent ensuite rares pour les deux années. Les smolts capturés à Alleyras sont à peine voire non smoltifiés (CNSS, 2013 ; CNSS, 2014). En aval du barrage, en 2013 et en 2014, à Chanteuges, un premier pic de passage est enregistré et coïncide avec le passage à Alleyras. Il y a toutefois d'autres périodes de passages qui semblent être liées au déstockage des migrants retardés dans la retenue de Poutès (CNSS, 2013 ; CNSS, 2014). Le deuxième pic au tambour de Chanteuges correspond au premier pic de passage détecté à la vidéosurveillance par LOGRAMI. En 2013, pour la première fois un pic de passage a été détecté début mars à la vidéosurveillance qui correspond au pic observé à Alleyras (CNSS, 2013).

De plus, le programme de recherche SALSEA MERGE qui travaille essentiellement sur la mortalité des saumons atlantiques en mer, ce qui a permis la création d'une énorme base de données génétiques, travaille aussi sur l'origine des post-smolts capturés en mer (Holst, 2012). Il a d'ailleurs été montré qu'en 2008, des post-smolts provenant de la souche Allier capturés et âgés en mer, devraient vraisemblablement avoir quitté l'estuaire aux alentours du 20 avril (Holst, 2012). Cette date est très vraisemblablement dépendante des conditions environnementales et de l'année. Néanmoins, elle peut servir de repère pour qualifier la dévalaison des smolts à Poutès.

Le fait que les smolts soient capturés en train de dévaler en amont du barrage dès le début du mois de mars en 2013 s'oppose clairement au pattern de dévalaison classique d'un pic de poissons au barrage de Poutès au 15 avril. Ces observations renforcent l'idée d'un impact fort de la retenue de Poutès qui n'a jamais été quantifié.

3. Quel est le comportement des smolts une fois dans la retenue ?

La question des mortalités directes par les ouvrages hydroélectriques a déjà été largement investiguée. Elles sont par exemple liées au passage par les turbines (Ruggles, 1980) ou encore la chute par les évacuateurs de crues lorsqu'ils sont ouverts. Au barrage de Poutès, le passage par les turbines Francis de deux groupes de smolts étudiés en 2004 ont mis en évidence une mortalité de 50% sur les juvéniles de saumons (Bach et al, 2004). En ce qui concerne le passage par les évacuateurs de crues, Smith (1938) a montré qu'un poisson de 5 à 10 cm de long pouvait survivre à une chute libre de 56 m. La mortalité par les évacuateurs de crues est donc presque nulle (Ruggles, 1980). Au barrage de Poutès, le suivi par radiopistage de 2004 a permis de mettre en évidence une efficacité de l'exutoire de l'ordre de 90% (Bach et al., 2014). Sa position, son débit et la répartition des vitesses à son approche le rendent plus propice aux passages des poissons que la prise d'eau (EDF, 2013). Une étude de 1984 menée par EDF a permis de calculer un taux de survie de truitelles, de tailles similaires à celles des smolts, injectées à l'entrée de la prise et récupérées à la sortie de l'usine. La mortalité moyenne mise en avant est de 41,3% (Travade et al., 2005). Toutefois, des problèmes subsistent tels que les retards de migration (de plusieurs jours à plusieurs dizaines de jours), des allers-retours dans la retenue et une désorientation qui favorisent la prédation (Travade et al., 2005), notamment des carnassiers et des truites fario d'une certaine taille (EDF, 2013).

Parmi les effets indirects d'une retenue, il y a la problématique de retard qu'elle induit. Les poissons peuvent être désorientés dans le réservoir. En effet, les vitesses de courant y sont plus faibles que celles des eaux libres de la rivière, voire inexistantes. Carr (1997) a montré que la nature lacustre de la retenue, les courants induits artificiellement et l'absence de déversement induisent un retard des smolts. Ces écoulements lents ou inexistantes conduisent à des allers-retours dans le réservoir qui ne sont pas naturels (EDF, 2013). Ces poissons retardés pourraient ne pas atteindre l'océan pendant leur fenêtre physiologique ou leur fenêtre environnementale. Du fait de leur désorientation dans la retenue, les smolts sont plus exposés à la prédation par des poissons qui vivent dans le lac ou des oiseaux (Larsson & Larsson, 1975 ; Poe & Rieman, 1988). Au barrage de Poutès, les prédateurs sont le plus vraisemblablement des truites (Bach et al, 2004) et des cormorans (comm.Pers François Travade). Les smolts peuvent aussi être désorientés à la sortie de l'exutoire ou des vannes de déversement ce qui en fait des proies potentielles pour les prédateurs.

De nombreuses études ont déjà été réalisées sur le barrage de Poutès et son impact sur la migration des saumons. Toutefois, les méthodes de suivi employées dans ces études demandaient une implication humaine importante et ne permettaient pas un suivi en continu des animaux. Si des observations ponctuelles d'allers-retours des poissons en queue de retenue ou de réticences à emprunter l'exutoire ont pu être faites, le retard pris par les poissons n'a pu être quantifié. D'autre part les suivis réalisés l'avaient été avec des poissons de pisciculture, totalement smoltifiés. Ces poissons avaient donc un comportement peut être non extrapolable aux juvéniles, à peine smoltifiés, entamant la dévalaison début mars.

La compréhension approfondie des comportements au droit de la retenue de Poutès permettra d'apporter les modifications nécessaires, dans la mesure du possible, au futur barrage. Dans le cadre de la reconfiguration du barrage, cette étude fera lieu d'état initial sur le comportement des smolts aux abords de la retenue du barrage de Poutès.

En 2014, une étude préalable étudiant le comportement des smolts à l'approche du barrage de Poutès a été réalisée. Cette étude de 2014 a permis de mettre au point un protocole pour 2015 qui sera détaillé dans la partie **III**. et permet d'expliquer certains choix réalisés. Dans cette étude, on se focalisera sur les données obtenues par la campagne de 2015.

III. Matériel et méthode

A. Zone d'étude et gestion du barrage sur la période d'étude

L'aire d'étude s'étend d'une zone en amont de la retenue appelée Vabres (à 7,650 km du barrage) jusqu'à une zone en aval du barrage dans le tronçon court-circuité, noté TCC (à 0,328 km

du barrage). Entre Vabres et le TCC, trois autres sites vont être étudiés en particulier : un site en amont de la retenue appelé Alleyras (à 4,639 km du barrage), un site en queue de retenue (à 3,175 km en amont du barrage) et un site en amont et à proximité du barrage. L'aire d'étude est présentée dans la Figure 8.

A Vabres, l'Allier présente son profil naturel de cours d'eau, alternant radiers et mouilles. La retenue s'étend du pont d'Alleyras jusqu'au barrage. Le courant est très faible dans cette zone et la profondeur importante. Le tronçon court-circuité retrouve l'alternance de radiers et de mouilles observée au niveau d'Alleyras.

Cette année, les débits n'ont pas dépassé $28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (débit maximum de $23,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur la période d'étude), il n'y a donc pas eu de déversement.

B. Matériel de télémétrie acoustique

1. La télémétrie acoustique 2D

Pour le suivi de la dévalaison des tacons, la méthode utilisée nécessitait de pouvoir suivre simultanément un nombre important d'individus, de petite taille (entre 100 et 150 mm), sur une grande distance et de permettre l'étude fine de la trajectoire des individus à l'aide d'un positionnement 2D à l'approche du barrage. De plus, la zone d'étude se trouvant dans une zone difficile d'accès, il fallait des récepteurs autonomes avec des durées de vie suffisante.

La technologie JSAT (Juvenile Salmon Acoustic Telemetry), dont le matériel est fourni par Lotek, répond à ces critères avec 65 000 identifiants uniques qui permet une individualisation du suivi, une taille en adéquation avec celle des tacons (moins de 2% de la masse à l'air des individus, Winter, 1996), une durée des messages des émetteurs inférieure à la milliseconde (faible taux de collision des signaux et relativement longue durée de vie des émetteurs) et un positionnement 2D possible avec le logiciel U-Map. Toutefois, cette technique nécessite un environnement acoustique relativement « calme » contrairement aux techniques de suivi par radiopistage qui s'accommodent des zones turbulentes.

Le principe de fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D est présenté dans l'annexe V.

2. Matériel acoustique

Le matériel et les logiciels utilisés pour le suivi des smolts sont de la marque canadienne Lotek.



Chatou, Hydrophone WHS 4000,
01.06.2015, Marine Lemaire

Figure 7: Hydrophone
WHS 4000

Les récepteurs (Figure 7) sont des hydrophones enregistreurs submersibles de type WHS 4 000 (Lotek). Ils ont une autonomie de 100 jours et enregistrent les données sur une carte SD de 2 Go. Ces hydrophones ont la capacité de s'enregistrer mutuellement, s'ils sont proches les uns des autres, grâce à un émetteur interne, appelé beacon, qui émet toutes les 15 secondes. Ceci leur permet d'effectuer les corrections d'horloge nécessaires au positionnement.

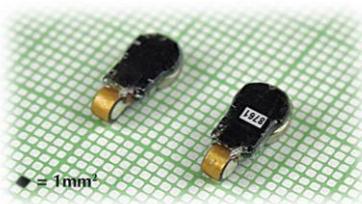


Figure 8: Emetteur JSAT AMT
(Lotek)

Les émetteurs (Figure 8) utilisés sont des JSAT AMT (Acoustic Micro Transmitter) du modèle LAMT-1,421 (Lotek). Ces émetteurs sont spécialement conçus pour équiper des salmonidés de petite taille et pèsent 0,32 g. Ils émettent toutes les 5 secondes et ont une autonomie supposée de 40 jours. Ce délai d'émission a été choisi afin d'avoir un compromis entre un positionnement le plus précis possible et une autonomie suffisante pour couvrir la période de dévalaison.

Le coût total du matériel du suivi est détaillé dans le Tableau 1.

Tableau 1: Coût matériel du suivi

Matériel	Coût unitaire (HT)	Quantité	Coût total (HT)
Hydrophone	2 000€	19	38 000€
Emetteur	146€	100	14 600€
Activateur d'émetteur	120€	1	120€
Logiciel d'exploitation U-Map	3 000€	1	3 000€

Avant d'être utilisés, les émetteurs sont activés au moyen d'un activateur. Le logiciel d'exploitation U-Map est le logiciel qui permet de calculer les positions des émetteurs et qui est présenté dans la partie **III-E-2-a.**

C. Sites d'installation

En 2014, le passage (présence/absence) sur un site était étudié avec un hydrophone par site. Cependant, les hydrophones émettent des bruits électroniques, qualifiés de « faux positifs », dont les noms peuvent correspondre à des émetteurs réellement existants et les auto-enregistrent ce qui peut interférer avec les données. Ce phénomène a rendu les données sur les sites de passage de 2014 difficiles à exploiter. Toutefois, ces bruits électroniques sont propres aux hydrophones et il y a peu de chance qu'ils soient émis au même moment sur trois hydrophones à la fois. C'est ce qui est exploité par le logiciel U-Map qui conserve une position seulement si elle est enregistrée par trois hydrophones au moins (triangulation des hydrophones, Annexe V). Par conséquent, en 2015, sur les trois sites où le passage est étudié, la technologie 2D a été détournée pour faire de la 1D : en effet, s'il est possible de positionner l'émetteur, il est donc possible de dire qu'il était présent dans la zone et à quelle date. Pour cela, ces trois sites sont équipés de quatre hydrophones : trois hydrophones pour leur permettre de trianguler et de calculer des positions, et un quatrième hydrophone pour s'assurer que tous les passages sont bien détectés.

En 2015, 19 hydrophones ont été répartis le long de l'Allier sur 4 sites, de l'amont vers l'aval (Figure 9) :

- 4 hydrophones sont en amont du barrage de Poutès, à Alleyras. Sur ce site on étudie le passage (présence/absence) des smolts afin de spécifier leur départ de la zone de relâche.

- 4 hydrophones sont en queue de retenue. Sur ce site on étudie le passage (présence/absence) des smolts afin de caractériser leur entrée dans la retenue, ainsi que leurs allers/retours potentiels entre le barrage et la queue de retenue.

- 7 hydrophones sont dans la retenue près du barrage. Sur ce site, on étudie les trajectoires des smolts dans la retenue à l'approche du barrage et de l'exutoire.

- 4 hydrophones sont dans le tronçon court-circuité, en aval du barrage de Poutès. Sur ce site, on étudie le passage (présence/absence) des smolts afin de confirmer le passage des smolts par l'exutoire.

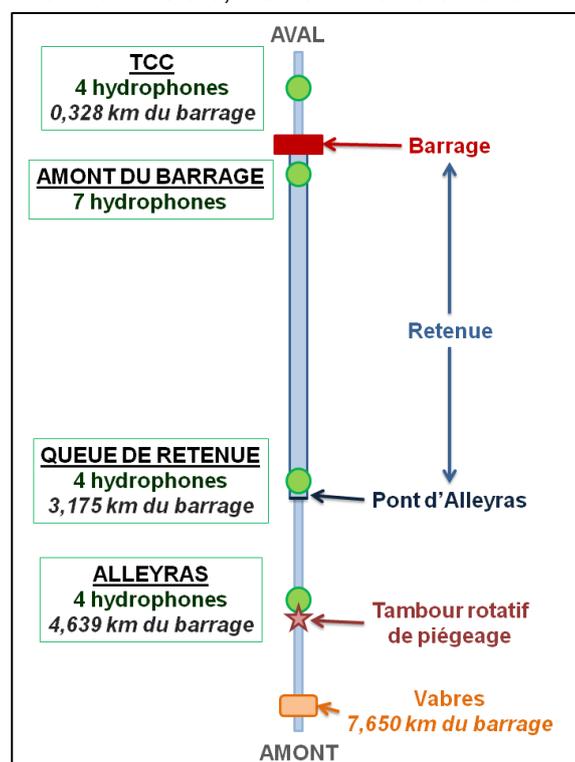


Figure 9: Positions des hydrophones le long de l'axe du site d'étude

Les coordonnées des hydrophones placés en queue de retenue et dans la retenue au droit du barrage ont été mesurées à l'aide d'un GPS différentiel donnant une précision allant de 3 cm à 50 cm au barrage de Poutès. Ce GPS fonctionne en mode base-mobile avec une antenne : la base connaît sa position exacte grâce aux satellites du système Orphéon, l'antenne communique avec la

base et calcule sa position à partir de la distance avec la base et la position de la base. Ce système est utilisé pour pallier l'étroitesse de la gorge et la faible connexion d'un GPS classique avec les satellites. Les coordonnées des hydrophones placés sur les sites d'Alleyras et du TCC ont été mesurées à l'aide d'un GPS de randonnée d'une précision de 1 à 2 m.



Poutès, Hydrophone WHS 4000,
Mars 215, Marine Lemaire

Figure 10: Montage des
hydrophones au corps mort

Les hydrophones sont maintenus sur le fond de l'eau grâce à une dalle en béton d'environ 25 kg (Figure 10). Pour élever sa sphère de détection, l'hydrophone est attaché à un tube PVC qui est rempli de béton et ancré sur la dalle. Par ce montage, l'hydrophone se trouve à environ 1 m du sol ce qui permet d'éviter tout obstacle empêchant la communication entre l'émetteur et l'hydrophone (embâcles, irrégularités du fond...). L'hydrophone est attaché au tube PVC à l'aide de colliers de serrage en plastique de type « colson ». Il est relié et fixé en berge ou au barrage à l'aide d'une corde.

Afin de déterminer une distance de détection maximale d'un hydrophone, des tests ont été réalisés au cours de la manipulation de 2014. Pour des sites en eaux courantes, la distance maximale de détection moyenne mesurée est de 81 m. ce sont les sites où le passage est étudié. En ce qui concerne la zone devant le barrage, la distance maximale de détection est de 80 m.

D. Capture – Marquage

Dans les études précédentes sur l'impact du barrage de Poutès, les saumons utilisés sont des smolts de pisciculture, smoltifiés (Bach et al., 2004). Etant donné les phénomènes observés en 2013, notamment l'initiation de dévalaison de smolts pas ou à peine smoltifiés, il a été décidé d'utiliser des smolts sauvages pour essayer d'approcher au mieux le comportement naturel des poissons. C'est pourquoi, ici, cent smolts sauvages ont été utilisés pour cette étude. Ils ont été capturés à l'aide d'un tambour rotatif (Figure 11) installé depuis le 10 mars dans la veine d'eau principale au niveau d'Alleyras, en amont du barrage (Figure 9). Ce tambour a été vérifié tous les jours à 9h le matin, à l'exception du 28 avril.

Les smolts sont ensuite placés dans un sceau et anesthésiés à l'aide d'huile de clous de girofle. Une fois endormis, ils sont pesés, mesurés et marqués puis placés rapidement dans un bassin de stabulation. Les données de chaque smolt capturé et étudié sont présentées dans le tableau de l'annexe

VI. Les émetteurs sont insérés dans la cavité abdominale, entre la peau et les muscles abdominaux des smolts par incision latérale. Le marquage dure moins d'une minute. Les poissons sont ensuite transportés dans une bassine jusqu'à Vabres où ils sont relâchés (3°40'28,1"E ; 44°54'14,3"N, 2,4 km en amont du tambour et 6,5 km en amont du barrage) (Figure 9). Les smolts sont relâchés au plus 24h après leur capture.

En 2014, les smolts avaient été relâchés à Chapeauroux (environ 20 km en amont) en un lot de 29 et un lot de 30 poissons avec pour volonté de garder le caractère grégaire de la migration. Certains poissons étaient donc stabulés quelques jours avant d'être relâchés. Devant l'impossibilité de déterminer si l'origine des faibles taux de recaptures (29 sur 59 juvéniles) étaient dus à la stabulation ou à la distance à parcourir, en 2015, les smolts sont relâchés à la suite de leur capture de manière à éviter toute perturbation dans le comportement qui pourrait être à l'origine des faibles taux de recapture de 2014. Lorsque des smolts sont recapturés, ils sont relâchés en-dessous du tambour rotatif situé à Alleyras (Figure 9). Un poisson relâché en-dessous du tambour s'est fait



Figure 11: Tambour rotatif à Alleyras (communication
interne)

recapturé au tambour, il est de nouveau relâché en-dessous-du tambour. Deux personnes ont été impliquées dans le marquage des smolts.

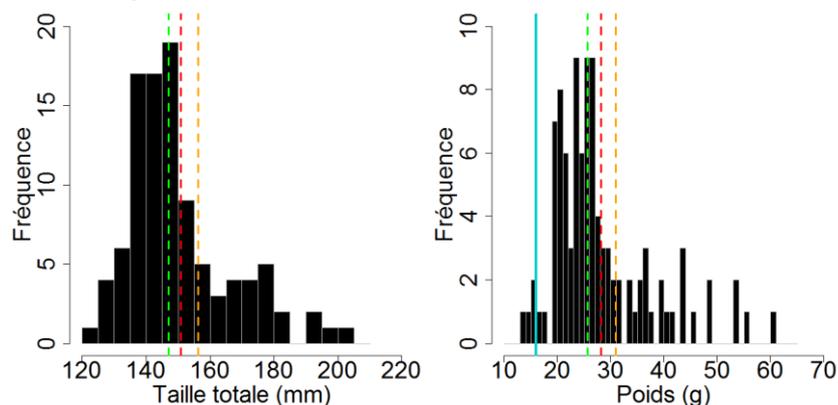


Figure 12: Histogrammes des tailles et des poids des smolts utilisés. Sur chaque graphique, la moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange. Sur l'histogramme des poids, la droite bleue représente 16g, le poids minimum que doivent faire les smolts pour pouvoir supporter la chirurgie.

Les poissons utilisés ont des tailles totales qui varient entre 122 et 203 mm (moyenne de 151 mm et médiane de 147 mm, Figure 12a)). Ce sont donc majoritairement des smolts au début de leur smoltification. Ils ont des poids allant de 13,7 g à 60,3 g (moyenne de 28,1 g et médiane de 25,6 g Figure 12b)). Afin de répondre aux exigences de masses mises en avant par Winter (1996), il faut que les smolts utilisés pèsent plus de 16 g. C'est le cas de 96 poissons sur 100.

E. Collecte, traitement des données et analyse des résultats

1. Récupération de données

a. Les données des hydrophones

Avant leur mise à l'eau, les horloges des hydrophones sont initialisées en prenant pour référence l'heure de l'ordinateur. Le changement d'heure n'est pas pris en compte par les hydrophones. Lorsque la période d'étude est finie et les hydrophones récupérés, les données sont extraites avec le logiciel HOST qui fournit un fichier par hydrophone. Au moment de l'extraction, les dates et heures des hydrophones ont été vérifiées en comparant avec les dates et heures en temps réel. Les hydrophones présentaient une dérive de temps : ils étaient en retard de 4min39 en moyenne par rapport au temps réel, avec un écart type de 36 secondes.

b. Les données environnementales

Les données de températures quotidiennes et de débits quotidiens ont été transmises par EDF. Les données de lever et de coucher de soleil ont été récupérées sur le site ptaff.ca. (ptaff.ca)

2. Analyse 1D

a. Calcul des positions

Le calcul des positions se réalise à l'aide du logiciel Lotek U-Map v.1.3.1.. Afin de calculer les positions, U-Map requiert les fichiers des hydrophones de la zone (ici, 4 zones sont exploitées), les coordonnées de leurs positions en projection UTM (Universal Transverse Mercator) ainsi que leur profondeur et une liste des numéros d'émetteur. Il faut aussi indiquer la température moyenne sur la période et la salinité afin d'obtenir la vitesse du son dans l'eau et calculer les positions des smolts. Dans la mesure où le barrage de Poutès se trouve à 860 km de l'estuaire, la salinité est supposée nulle. En ce qui concerne la température sur la période, elle était en moyenne égale à 9,8°C avec un écart type de 3,48°C. U-Map calcule une vitesse du son dans l'eau de 1 446,3 m.s⁻¹. La dérive de temps des hydrophones est prise en compte et corrigée par U-Map.

Les données fournies par U-Map sont constituées d'une ligne de données par position calculée. Pour chaque ligne, les informations fournies sont les coordonnées de la position en projection UTM, la date exacte de la position (à 0,00001 seconde près), le nombre d'hydrophones qui ont servis à calculer la position et un indicateur de la précision appelée DOP (Dilution of precision). La DOP correspond à une mesure de la précision théorique de la position calculée d'une matrice étant

donnée la position des hydrophones et la résolution du temps de mesure des hydrophones. Plus la DOP est élevée, plus la position calculée est incertaine.

Remarque : La DOP est une valeur, calculée par le logiciel, qui permet de connaître la précision relative des positions calculées. Toutefois, il n'existe pas de valeurs de la DOP préconisée par le fabricant permettant de s'assurer de la précision d'une position.

b. Choix des données exploitées en 1D et problématique des faux positifs

Pour l'analyse 1D, toutes les positions calculées par U-Map sont conservées. En effet, si une position est calculée, c'est que le signal émis a été reçu par au moins trois hydrophones en même temps, on peut donc considérer que le smolt était présent à ce moment-là dans la zone, quelque soit la valeur de son positionnement.

L'utilisation de U-Map permet de ne pas avoir à tenir compte des « faux positifs ». Toutefois, les premières analyses ont révélé que ce n'était pas suffisant car des poissons sont ratés en zones courantes. En effet, des smolts positionnés au barrage n'étaient pas positionnés sur les stations en amont. De la même façon, des smolts passés dans le TCC ont pu être ratés. Il a donc fallu trouver une méthode permettant d'extraire les détections des vrais émetteurs afin de les séparer des faux positifs enregistrés par l'hydrophone et ayant comme code celui d'un émetteur. Pour remédier à ce problème, les émissions reçues par chaque hydrophone ont été extraites grâce au logiciel HOST puis étudiées. Un fichier par numéro d'émetteur et par hydrophone est extrait. Une routine est écrite dans le logiciel R pour regrouper les détections d'un émetteur par les hydrophones d'une station au même moment avec plus ou moins une minute de décalage pour tenir compte de la dérive de temps. Un examen de la sortie de R permet d'extraire les vrais passages d'un poisson. A partir de là, les dates et heures de passages des smolts à chaque stations sont connues.

c. Etude du comportement des smolts le long de l'axe d'étude

En première approche, la migration des smolts a été analysée qualitativement en comparant les profils de migration sur l'axe d'étude et en les classifiant en une typologie basée sur des similarités de comportement. Le profil migratoire de chaque smolt est représenté sous l'angle de la distance à l'exutoire en fonction du temps permettant d'avoir une vision de la migration du lâcher jusqu'au barrage. L'exutoire a pour coordonnées en projection UTM fuseau 31 (553066,4E ; 4977295,1N). A Vabres (à 7,135 km de l'exutoire), un seul point est enregistré et représenté. Pour les stations d'Alleyras (à 4,639 km de l'exutoire) et du TCC (à -0,328 km de l'exutoire), les dates d'arrivée et de départ de la station sont représentées. Pour la station de la queue de retenue (à 3,715 km de l'exutoire) et du barrage, toutes les positions enregistrées sont représentées. Dans la zone du barrage, les distances à l'exutoire sont calculées pour chaque position avec la formule de la distance euclidienne entre deux points La première position de tous les smolts est représentée par un point bleu. Si le smolt est détecté dans le TCC, sa dernière position est représentée par un point vert. Dans le cas contraire, sa dernière position est représentée par un point rouge. Tous les profils sont présentés en annexe VII.

Pour l'étude du comportement des smolts dans la retenue, la notion de « tentative » a été définie. Une tentative correspond à une venue du smolt au barrage. Elle est séparée d'une autre tentative par un intervalle de temps entre deux positions détectées qui sera déterminé dans le **IV-4-a.**

Remarque : La projection UTM correspond à une projection de la Terre sur un cylindre. A petite échelle, comme c'est le cas ici, il est possible de considérer que ce cylindre est plat. Dans ce cas-là, la formule de distance euclidienne peut s'appliquer. La projection est considérée sans distorsion ici.

3. Analyse 2D

a. Quelles données prendre en compte lors de la détermination des positions ?

En acoustique, un grand nombre de données est généré avec une bonne précision. Toutefois, une partie d'entre elles sont moins précises pour des raisons diverses (environnement acoustique, onde réfléchi...). Pour cette raison, toute étude acoustique nécessite au préalable d'effectuer un

test du taux de positionnement (rapport entre le nombre de positions réellement calculées et le nombre d'émissions théoriques) et un test de l'erreur de positionnement réelle (différence en mètres entre la position réelle et la position calculée) (Roy, 2014). Ce test et ses résultats sont présentés en annexe VIII. Il faut ensuite étudier la précision théorique des positions. L'étude du nombre de données conservées en fonction de la DOP permettra de trouver le meilleur compromis entre quantité et qualité des données. Une fois la précision qui semble la plus appropriée déterminée, les logiciels QGIS et R avec des packages appropriés permettent d'étudier le positionnement 2D des smolts.

b. L'exploitation des positions

Les positions et trajectoires des smolts ont été tracées sur QGIS à l'aide du plugin points2One.

Les données ont aussi été traitées à l'aide de plusieurs packages sur R. Premièrement le package raster (Hijmans, 2012) qui permet de réaliser une partie des cartes présentées par la suite. Ensuite, le package adehabitatHR (Calenge, 2015) qui permet d'étudier la probabilité de présence des smolts dans la retenue. Il se base sur une distribution d'utilisation de l'espace (van Winkle, 1975). Cette approche soutient que l'utilisation de l'espace par un animal peut être décrite par une fonction de densité de probabilité bivariée, appelée UD (utilization distribution), qui donne la densité de probabilité de localiser un individu à un endroit en fonction des coordonnées (x,y) de cet endroit. L'estimation de l'UD en utilisant des données de positions est réalisée grâce à la méthode de kernel (Silverman, 1986). Dans ce package, plusieurs paramètres de la fonction *kernel* sont accessibles : le quadrillage qui va définir la résolution de la carte, un paramètre permettant de dessiner les cartes de tous les animaux avec les mêmes limites géographiques et la même échelle de couleurs, le paramètre de lissage de la fonction *kernel* h. Le dernier package utilisé est le package adehabitatLT (Calenge, 2011) qui permet de tracer les trajectoires, d'étudier des tentatives et qui fournit des données sur l'évolution des positions d'une trajectoire.

Remarque : Dans la fonction *kernel*, le paramètre de lissage peut être pris dans une fenêtre de référence ou il peut être calculé pour coller le mieux possible aux données (Least Square Cross Validation). Pour cela, il faut fournir une fenêtre de valeurs dans laquelle, à partir d'un algorithme, R va chercher à minimiser le critère de validation croisée. Toutefois, ce critère ne peut pas toujours être minimisé dans la fenêtre de valeurs fournies, dans ce cas là il ne faut pas utiliser ce paramètre. C'est le cas pour certains smolts dans cette étude.

IV. Résultats

A. Comment s'effectue le transit des smolts dans la zone de Poutès ?

1. Quels facteurs environnementaux influencent le départ en migration ?

Les deux facteurs environnementaux principaux susceptibles d'influencer le départ en migration sont la température (Martin, et al., 2011) et le débit (Enders et al., 2012). Alleyras étant la première station que les smolts doivent passer une fois qu'ils sont remis à l'eau, l'étude du passage des smolts à cette station permet de montrer l'impact de ces facteurs sur l'initialisation de la migration.

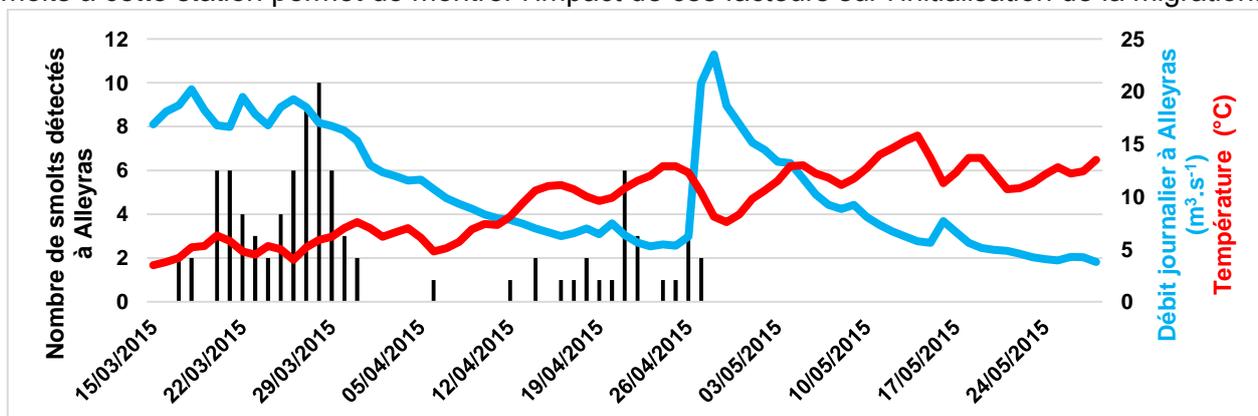


Figure 13: Nombre de smolts détectés à Alleyras et évolution de la température et du débit à Alleyras

Au cours de la période d'étude, il n'y a pas eu d'évènements de crues. Pour le débit, la Figure 13 montre qu'il y a une première période relativement stable (avec de petits pics) entre 16 et 20 m³.s⁻¹ suivi d'une nette diminution jusqu'à un second pic (23,5 m³.s⁻¹). La température est croissante sur toute la période de l'étude (de 3,5°C à 16,1°C).

Deux périodes de migration se dégagent de ce graphique : une première du 15 au 30 mars et une deuxième du 12 au 26 avril. La première période de migration peut s'expliquer par de légères augmentations de la température et des petits soubresauts de débits. Les deux pics dans le passage des smolts (6 et 10 smolts) correspondent à une augmentation de la température ainsi qu'à une augmentation du débit à chaque fois (aux alentours du 21 et du 29 mars). La baisse importante du débit entraîne ensuite un arrêt des passages du 31 mars au 9 avril. La deuxième période de migration se déroule en dehors d'un pic de débit, mais avec une température aux alentours de 10°C toujours croissante.

Remarque : Il est important de noter que malgré les conditions environnementales qui semblent bonnes pour une initiation de migration, si plus aucun smolt n'est détecté c'est parce que tous les smolts marqués sont déjà passés.

2. Taux de présence et taux de transfert sur la zone d'étude

L'étude des détections grâce au logiciel HOST permet de connaître le nombre de smolts qui sont réellement passés dans chaque station et de les comparer avec les détections fournies par U-Map dans le Tableau 2. Le « taux de détection de la station » correspond au nombre de smolts détectés par U-Map par rapport au nombre de smolts détectés à l'aide du logiciel HOST. Le « taux de passage » correspond au nombre de smolts passés dans une station.

Tableau 2: Nombres de smolts marqués détectés aux différentes stations après exploitation des données avec U-Map puis avec HOST

	Vabres	Alleyras	Queue de retenue	Barrage	TCC
Nombre de smolts détectés par U-Map (Taux de détection de la station)	X	90 (96,8%)	84 (90,3%)	91 (100%)	45 (75%)
Nombres de smolts détectés (Taux de passage)	100	93 (93%)	93 (93%)	91 (91%)	60 (60%)

Les stations de détection d'Alleyras et de la queue de retenue ont un taux de détection de plus de 90%. Celle du TCC permet de détecter les ¾ des smolts passés.

93% des smolts lâchés à Vabres sont détectés à Alleyras. Entre Alleyras et la Queue de retenue, le nombre de smolts détectés est conservé. Deux smolts ne sont plus détectés entre la Queue de retenue et le barrage. 60% des smolts lâchés à Vabres sont détectés dans le TCC. Il est intéressant de noter que, exception faite des deux smolts perdus entre les stations de la queue de retenue et du barrage dès le début, tous les smolts présents en queue de retenue se présentent au moins une fois au barrage.

Le taux de transfert correspond au pourcentage de smolts qui transitent entre chaque station et permet de mettre en avant les zones qui posent problème. Ils sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3: Taux de transfert entre les stations de l'axe d'étude

	Vabres — Alleyras	Alleyras — Queue de retenue	Queue de retenue — Barrage	Barrage — TCC
Distance (km)	2,496	1,464	3,418	0,328
Taux de transfert	93%	100%	98%	66%

Les taux de transfert entre Vabres et le barrage sont supérieurs à 90%. 2/3 des smolts détectés dans la zone du barrage sont détectés dans le TCC.

Les taux de présence et de transfert des smolts permettent de connaître la présence des smolts tout le long de la zone d'étude. Nous allons maintenant nous intéresser aux caractéristiques de cette migration.

Remarque : Les hydrophones placés en Queue de retenue sont placés plus en aval que la vraie queue de retenue pour des questions de profondeur vues dans la partie V-A-1.. Il est possible que

des smolts dont on considère qu'ils s'arrêtent entre Alleyras et la Queue de retenue se soient en réalité arrêtés dans la vraie queue de retenue, ceci peut créer un biais sur le nombre de smolts réellement entrés dans la retenue, sur la date d'entrée, les temps et zone d'attente et de transit.

3. Temps de transit et de temps de résidence dans la retenue

Les temps de transit entre la zone de lâcher et les autres stations sont calculés en utilisant les dates et heures de lâcher des smolts et leur première détection dans chaque zone : Alleyras, la retenue (Queue de retenue) et le TCC.

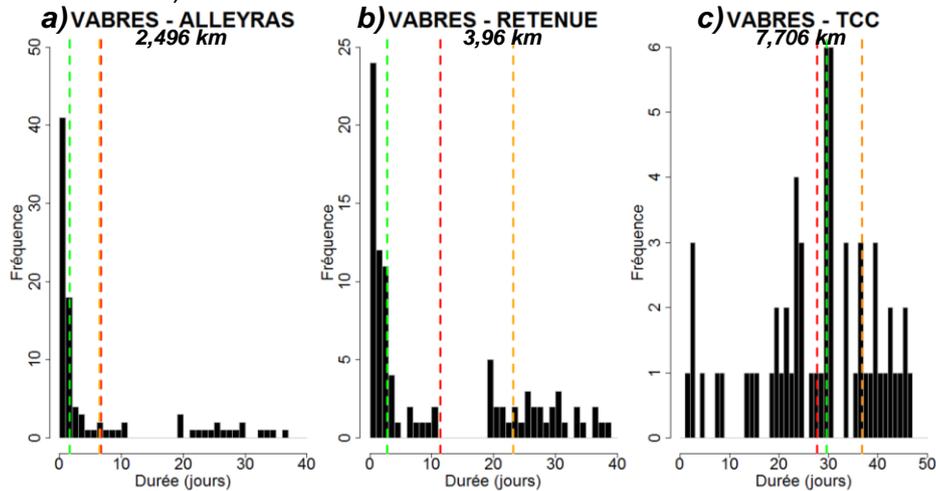


Figure 14: Durée entre la zone de lâcher et les stations d'Alleyras, de la retenue et du TCC. Sur chaque graphique, la moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange.

La Figure 14 montre que le temps de transit de Vabres à Alleyras est généralement court (temps médian de 1,7 jours ; temps moyen de 6,7 jours ; temps maximum de 36,7 jours ; temps minimum de 1h55). La vitesse médiane des smolts sur ce tronçon est de $1,84 \text{ cm.s}^{-1}$ (vitesse minimum de $0,7 \text{ mm.s}^{-1}$; vitesse maximum de 36 cm.s^{-1}). L'arrivée en Queue de retenue est aussi relativement rapide (temps médian de 2,8 jours ; temps moyen de 11,4 jours ; temps maximum de 38,1 jours ; temps minimum de 9h36). Une structure semblable est observée entre ces deux graphiques : une forte fréquence de temps de transit court est observée avec une faible fréquence de temps de transit long. Sur ces deux graphes, l'absence de temps de transit entre 10 jours et un peu moins de 20 jours est notable. Certains individus ont attendu avant de reprendre leur migration. En revanche l'histogramme des temps de transit de Vabres jusqu'à la zone du TCC ne présente pas cette structure et les temps de transit sont plus longs (temps médian de 29,6 jours ; temps moyen de 27,7 jours ; un temps maximum de 46,2 jours ; temps minimum de 1,6 jours).

Les temps de transit entre deux stations sont calculés avec la date et heure de première détection dans la station d'arrivée et la date et heure de dernière détection dans la station de départ. Ils sont présentés dans la Figure 15.

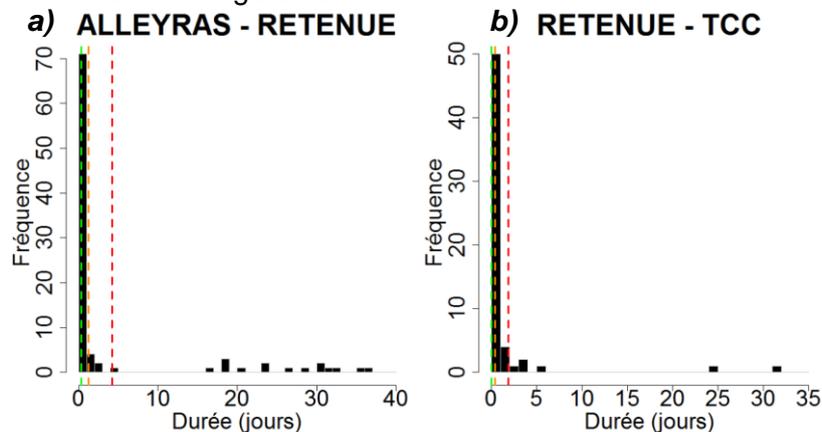


Figure 15: Temps de transit entre Alleyras et la Queue de retenue et entre le barrage et le TCC. Sur chaque graphique, la moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange.

La majorité des temps de transit sont inférieurs à un jour pour les deux tronçons (troisième quartile de 21h36 entre Alleyras et la Queue de retenue et de 12 heures entre l'entrée dans l'exutoire et la station du TCC). Les vitesses médianes de transit sur ces tronçons sont respectivement de $16,7 \text{ cm.s}^{-1}$ (vitesse minimum de $0,4 \text{ mm.s}^{-1}$; vitesse maximum de $1,4 \text{ m.s}^{-1}$) et de $22,3 \text{ cm.s}^{-1}$ (vitesse minimum de $0,12 \text{ mm.s}^{-1}$; vitesse maximum de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$).

Les temps de transit ne permettent pas d'expliquer la rupture de la structure des histogrammes et les temps de transit longs entre la zone de lâcher et la zone du TCC vus à la Figure 15. Ces phénomènes peuvent être dus aux temps de résidence dans la retenue. Etant donné que les smolts s'arrêtent très probablement entre la Queue de retenue et le barrage, le temps de transit entre ces deux stations est appelé « temps de résidence ». Le temps de résidence dans la retenue est calculé en utilisant des dates et heures de la première détection dans la Queue de retenue et de la dernière détection dans toute la retenue (Queue de retenue ou zone du barrage).

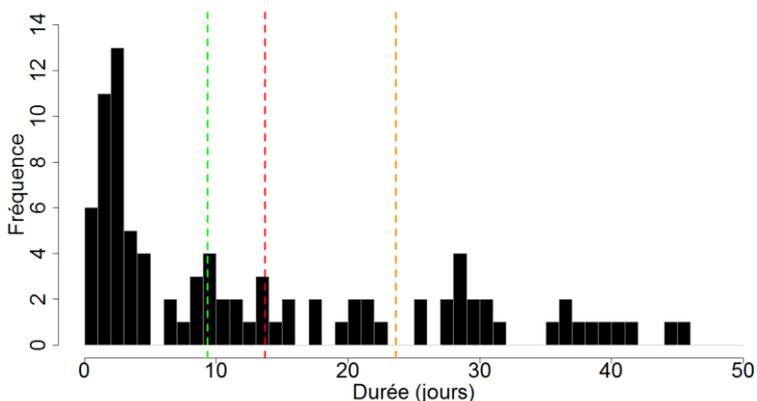


Figure 16: Temps de résidence dans toute la retenue. La moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange.

La Figure 16 montre que tous les smolts qui arrivent au barrage restent en médiane 9,3 jours dans la retenue (temps moyen de 13,7 jours ; temps maximum de 45,3 jours ; temps minimum de 19h12). 25% des smolts restent plus de 23,6 jours dans la retenue. Un smolt peut faire des allers-retours dans toute la retenue et, par conséquent, avoir une date de dernière détection en Queue de retenue postérieure à la date de première détection dans la zone du barrage. Pour calculer une vitesse des smolts dans la retenue, ce sont donc les dates et heures de la première détection en Queue de retenue et dans la zone du barrage qui sont utilisées. La vitesse médiane entre ces deux stations est de $1,94 \text{ cm.s}^{-1}$ (vitesse moyenne de $4,3 \text{ cm.s}^{-1}$; vitesse minimum de $0,56 \text{ mm.s}^{-1}$; vitesse maximum de $22,7 \text{ cm.s}^{-1}$).

Afin de voir si le comportement des smolts qui sont passés dans le TCC est différent de celui qui ne sont pas passés dans le TCC, leur temps de résidence dans la retenue est analysé. Les temps ne semblent pas différents avec un temps médian de 9,5 jours (temps maximum de 45,3 jours ; temps minimum de 0,8 jours) pour les smolts passés dans le TCC et de 8,2 jours pour les autres (temps maximum de 40,5 jours ; temps minimum de 0,8 jours). Une analyse de la variance permet de dire que le temps passé dans la retenue par ces deux groupes n'est pas significativement différent ($P = 0,8014 > 0,05$).

Le Tableau 4 permet de résumer les caractéristiques de chaque tronçon de la zone d'étude.

Tableau 4: Tableau récapitulatif des distances, des taux, temps et des vitesses de transfert entre les stations.

	Vabres	Alleyras	Queue de retenue	Barrage
	-	-	-	-
	Alleyras	Queue de retenue	Barrage	TCC
Distance (km)	2,496	1,464	3,418	0,328
Taux de transfert	93%	100%	98%	66%
Temps médian de transfert	1,7 jours	0,1 jours	9,3 jours	0,03 jours
Vitesses médianes	$1,84 \text{ cm.s}^{-1}$	$16,7 \text{ cm.s}^{-1}$	$1,94 \text{ cm.s}^{-1}$	$22,3 \text{ cm.s}^{-1}$

4. Profils et comportement à l'abord de la retenue

Les profils migratoires permettent d'avoir un aperçu du comportement des smolts à l'abord de la retenue. Les profils sont tous présentés en annexe VII. La Figure 17 présente le profil migratoire du smolt 40795 et les différentes stations d'enregistrement sur la zone d'étude.

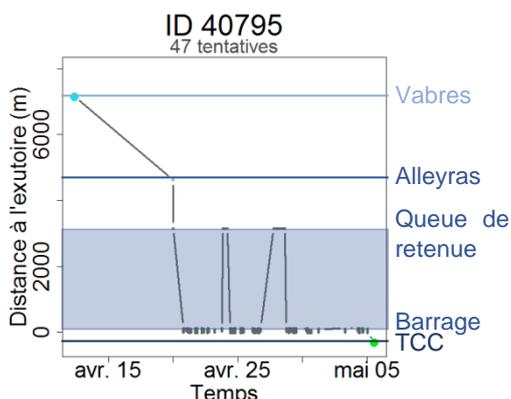


Figure 17: Profil migratoire du smolt 40795 avec les différentes stations d'enregistrement. La zone encadrée en bleu représente toute la retenue.

Ce smolt a été relâché le 12 avril à Vabres. Il est ensuite détecté à Alleyras ainsi qu'en Queue de retenue et dans la zone du barrage le 20 avril. Puis, il réalise plusieurs tentatives avant de retourner en Queue de retenue le 24 avril. Il revient ensuite dans la zone du barrage, et essaie plusieurs fois de franchir le barrage avant de retourner en Queue de retenue le 27 avril. Il reste en Queue de retenue avant de retourner dans la zone du barrage le 28 avril. Finalement, après de nombreuses tentatives, il franchit le barrage le 5 mai et est détecté dans le TCC le 5 mai (point vert).

Les profils montrent qu'une fois remis à l'eau certains smolts ne reprennent pas leur migration immédiatement, comme ici sur la Figure 16. En effet, ce smolt atteint la station d'Alleyras 8 jours après sa remise à l'eau. Or, sur ce tronçon, la vitesse médiane est de $1,84 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. De plus, cette observation est en accord avec ce qui a été vu sur la Figure 14. Les profils permettent de mettre en avant que ce phénomène arrive une seule fois et sur une portion du parcours (entre Vabres et Alleyras, entre Alleyras et la Queue de retenue ou en Queue de retenue). Au vu de la structure de la Figure 14 a) et b) et de la moyenne du temps de transit (11,4 jours), un seuil de temps de 11,4 jours est déterminé pour catégoriser ce phénomène. 63,4% des smolts qui arrivent au barrage arrive en queue de retenue avant ce seuil et 36,6% arrivent après ce seuil.

Le classement des profils se fera suivant leur comportement et leur activité au niveau de la retenue. Pour caractériser les comportements des smolts dans la retenue, il faut définir deux notions : les venues dans la zone du barrage, appelées tentatives, et les allers-retours jusqu'en queue de retenue.

a. Identification des venues dans la zone du barrage

Pour définir une venue au barrage, il faut trouver un seuil de temps qui peut potentiellement discriminer deux venues d'un même smolt dans la zone du barrage. Pour ce faire, les intervalles de temps entre chaque position d'un même smolt sont calculés. Les intervalles de temps varient de 5 secs (qui correspondent au délai d'émissions des émetteurs) à 192 jours (médiane de 5 secs ; troisième quartile de 10,2 secs). Les intervalles de temps inférieurs à 1 min sont très nombreux (84% des données) et ceux supérieurs à 1h sont peu nombreux (0,22% des données). Les intervalles inférieurs à 1 min sont supposés correspondre aux intervalles de temps entre deux émissions tout en considérant que certaines émissions n'ont pas été entendues ou que des positions n'ont pas été calculées. Au vu du nombre d'intervalles de temps supérieurs à 60 min, ce laps de temps n'est pas assez discriminant pour séparer deux venues au barrage, le seuil de temps choisi sera donc inférieur à 60 min. Ainsi, afin de déterminer un intervalle de temps entre deux positions enregistrées capable de discriminer deux venues au barrage, les intervalles compris entre 1 min et 60 min sont observés sur la Figure 18.

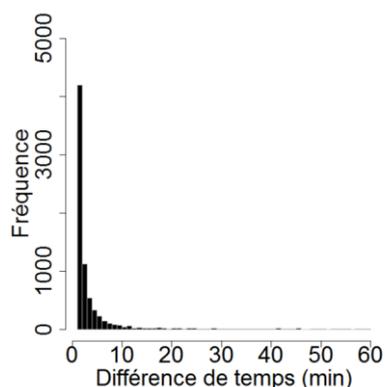


Figure 18: Histogramme des différences de temps comprises entre 1 et 60min.

Au vu de ce graphique, les valeurs d'intervalles de temps ont de fortes fréquences en-dessous de 10 min. Il semblerait que deux tentatives peuvent être séparées par 20 min. Par précaution, le seuil de temps entre deux positions est posé à 30 min.

b. Identification des allers-retours en queue de retenue

Il faut différencier les tentatives des allers-retours jusqu'en Queue de retenue. En effet, une tentative est considérée comme une venue dans la zone du barrage (définie dans le III-E-c.) et une fin de tentative correspond donc à une sortie de cette zone mais pas forcément à une remonté jusqu'en Queue de retenue.

Tous les smolts ne font pas d'allers-retours jusqu'en Queue de retenue. 64,8% des smolts sont concernés par ce phénomène et 11,4% des tentatives correspondent à des allers-retours jusqu'en Queue de retenue.

c. Classement des profils

Une première séparation est faite suivant le temps de résidence dans la retenue. D'après la Figure 16, le temps médian de résidence des smolts dans la retenue est de 9,3 jours. Un seuil de 10 jours est donc fixé pour séparer les smolts dont le passage dans la retenue est rapide et ceux dont le passage est lent. Ensuite, au vu des profils et des comportements des smolts, 6 classes sont définies :

✓ Profil 1 : Smolts très efficaces

Les smolts de ce groupe sont présents 10 jours ou moins dans la retenue. Ils présentent des tentatives rapprochées dans le temps, sans allers-retours jusqu'en Queue de retenue.

Par exemple, le smolt 14489 (Figure 19) ne reprend pas la migration dès qu'il est remis à l'eau. Toutefois, une fois qu'il commence sa migration, il passe rapidement la zone de la retenue, en moins de 10 jours (en 1.3 jours). Après 4 tentatives, ce smolt franchit le barrage en empruntant l'exutoire et est détecté dans le TCC.

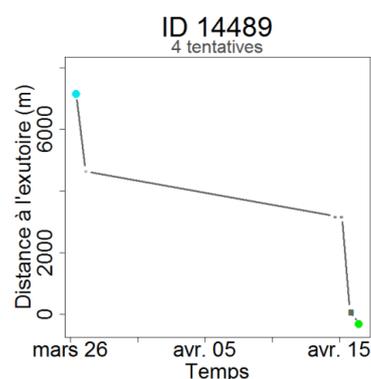


Figure 19: Profil du smolt 14489

Profil 2 : Smolts explorateurs et efficaces

Les smolts de ce groupe restent 10 jours ou moins dans la zone de la retenue. Ils sont mobiles c'est-à-dire qu'ils présentent de nombreuses tentatives et éventuellement des allers-retours jusqu'en Queue de retenue.

Le smolt 40305 (Figure 20) ne reprend pas sa migration au moment de sa remise à l'eau. Après ce temps d'inactivité, il devient très actif et fait des allers-retours jusqu'en queue de retenue ainsi que plusieurs tentatives. Finalement, il n'est pas retrouvé dans le TCC.

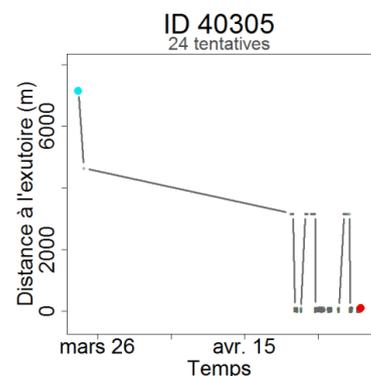


Figure 20: Profil du smolt 40305

✓ Profil 3 : Smolts lents pour trouver l'exutoire mais toujours actifs

Dans cette classe, les smolts ont un temps de résidence dans la retenue supérieur à 10 jours. Toutefois, ils restent actifs tout au long de leur présence dans la retenue.

Lorsqu'il est remis à l'eau, le smolt 62649 (Figure 21) ne reprend pas sa migration directement. Une fois qu'il se remet en mouvement le long de l'axe, après le 20 avril, il devient très actif, fait de nombreux allers-retours jusqu'en Queue de retenue et de nombreuses tentatives dans la retenue. Il est détecté dans le TCC.

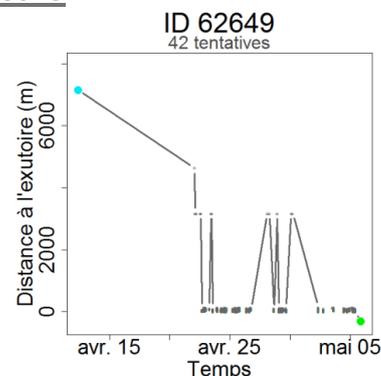


Figure 21: Profil du smolt 62649

Les nombres de smolts dans chaque classe et le pourcentage que cela représente parmi tous les smolts sont représentés dans le Tableau 5 ainsi que le pourcentage de smolts détectés dans le TCC pour chaque classe :

Tableau 5: Nombre de smolts dans chaque classe et pourcentage de smolts détectés dans le TCC par classe

	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil 5	Profil 6
Nombre de smolts	28	21	12	14	13	3
(Pourcentage des smolts)	(30,7%)	(23,1%)	(13,%)	(15,4%)	(14,3%)	(3,3%)
Nombre de smolts détectés dans le TCC	16	14	7	9	12	2
(Pourcentage de smolts détectés dans le TCC)	57,1%	66,7%	58,3%	64,3%	92,3%	66,7%

Il n'y a pas de lien notable entre le passage des smolts dans le TCC et leur comportement à l'abord de la retenue. Les smolts les plus nombreux sont ceux qui passent rapidement en peu de tentatives et pas d'aller-retour jusqu'en Queue de retenue. Les deuxièmes plus importants en nombre sont ceux qui « explorent », qui ont beaucoup de tentatives dès qu'ils arrivent dans la retenue.

L'observation de tous les profils permet de mettre en évidence un changement de comportement aux alentours de la mi-avril. En effet, pour les smolts qui ont eu un temps d'inactivité que ce soit entre Vabres et la Queue de retenue ou dans la Queue de retenue, peu importe leur classe, ils ont repris une activité vers la mi-avril. Sur les 90 smolts lâchés à Vabres en mars, 81 sont arrivés dans la retenue, parmi lesquels 59 smolts montrent une reprise d'activité à la mi-avril (72,8%).

Les profils permettent de connaître le nombre d'allers-retours jusqu'en Queue de retenue réalisés par smolts. Un aller simple jusqu'en Queue de retenue est compté comme un demi aller-retour. L'histogramme du nombre d'allers-retours est présenté à la Figure 25.

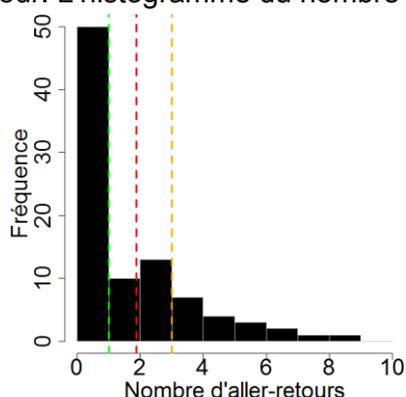


Figure 25: Histogrammes du nombre d'allers-retours jusqu'à la queue de retenue. La moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange.

Le maximum d'allers-retours jusqu'en Queue de retenue est de 9. 64,8% des smolts font des allers-retours jusqu'en Queue de retenue. La médiane est de 1 aller-retour et le troisième quartile est de 3.

Il est important de noter que malgré leurs allers-retours jusqu'en Queue de retenue, les smolts ne sont jamais détectés à la station d'Alleyras une fois qu'ils sont arrivés dans la retenue.

5. Les devenir des smolts

Sur les 100 smolts lâchés à Vabres, 91 arrivent au barrage parmi lesquels 60 sont détectés dans le TCC.

Pour les smolts présent dans la zone du barrage et non détectés dans le TCC (31 smolts), il est intéressant de savoir où se trouve leur dernière détection. Les profils permettent de savoir si la dernière détection est dans la zone du barrage ou en queue de retenue. 6 smolts ont leur dernière détection en Queue de retenue. Pour les smolts dont la dernière détection est dans la zone du barrage (25 smolts), les 100 dernières positions, de $DOP \leq 0.3$ (partie IV-B-1.), sont observées à l'aide du package adehabitatLT et présentés dans l'annexe IX pour chaque smolt. La représentation des 100 dernière positions du smolt 8944 sont représentées sur la Figure 26.

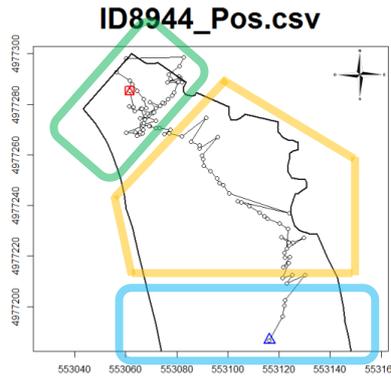


Figure 26: Les 100 dernières détections du smolt 8944. Le triangle bleu représente la première position (parmi les 100 prises en compte), le carré rouge représente la dernière position.

Trois zones de dernière détection sont définies : une zone près de la prise d'eau et de l'exutoire qui peut être sous leur influence (encadrée en vert), une zone au milieu du site étudié (encadrée en jaune) et une zone en fin de la zone de détection du barrage (encadrée en bleu). La zone sous influence de la prise d'eau et de l'exutoire est définie comme la zone où les smolts peuvent être attirés par le courant créé par la prise d'eau ou l'exutoire. 16 smolts ont leur dernière détection dans la première zone, 2 dans la deuxième zone et 7 dans la troisième zone.

Par exemple, le smolt 8944 a eu sa dernière détection dans la zone d'influence de la prise d'eau. Le Tableau 6 récapitule les zones de dernière détection des 91 smolts présents au barrage.

Tableau 6: Dénombrement des smolts suivant leur zone de détection de la dernière position

	Hors du TCC				
	Dans le TCC	Zone d'influence de la prise d'eau et de l'exutoire	Milieu de la zone du barrage	Fin de la zone du barrage	Queue de retenue
Nombre de smolts	60	16	2	7	6
(Pourcentage)	(66%)	(17,6%)	(2,2%)	(7,7%)	(6,6%)

La majorité des smolts présents dans la zone du barrage sont ensuite détectés dans le TCC (66%). 17,6% des smolts sont détectés pour la dernière fois dans la zone d'influence de la prise d'eau et de l'exutoire.

Le comportement global des smolts sur l'axe d'étude et dans la retenue est connu. Mais comment se comportent-ils dans la zone du barrage et à l'approche de l'exutoire ?

B. Comportement dans la zone du barrage

Les individus étudiés ici sont les 91 smolts détectés dans la zone du barrage.

1. Les données de positionnement : un compromis entre précision et conservation des données

Avant d'utiliser ces données, il faut les trier pour trouver le meilleur compromis possible entre un nombre suffisant de positions exploitées et l'élimination des positions situées en dehors de l'emprise de la retenue.

Le nombre de données brutes par smolt est très variable (annexe X). Il varie de 85 à 21 531 données (moyenne de 5 992 de données ; médiane de 4 181 données). Le nombre de données d'un smolt dépend du temps qu'il a passé dans la zone du barrage où il est détecté.

La DOP va permettre de trouver un compromis entre nombre de données et précision du positionnement. Elle varie de 0,06 à 15,99 (moyenne de 0,6378 ; une médiane de 0,17). Afin de déterminer un seuil de DOP, la courbe du pourcentage de données conservées pour tous les smolts en fonction de la valeur de la DOP est tracée sur la Figure 27.

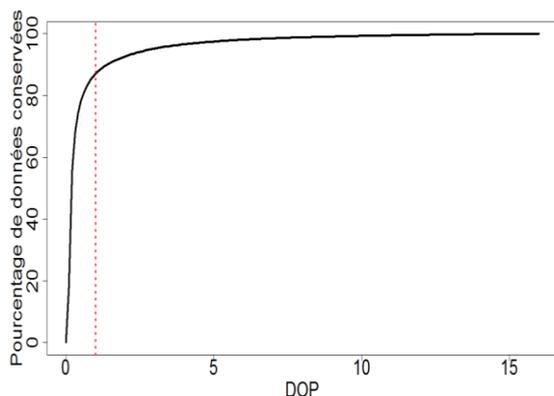


Figure 27: Pourcentage de données conservées en fonction de la DOP. Les pointillés rouges correspondent à une DOP = 1.

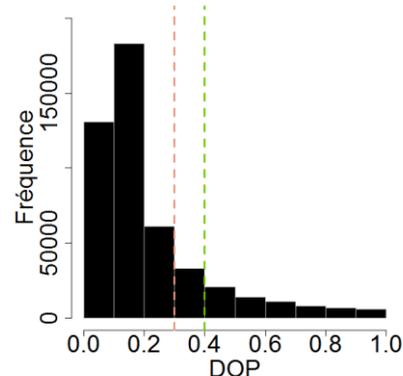


Figure 28: Histogramme des DOP inférieures à 1. Les pointillés rouges correspondent à une DOP = 0.3 et les pointillés verts à une DOP = 0.4.

Sur la Figure 27, la courbe atteint un plateau aux alentours de $DOP = 1$. Il y a une rupture de pente pour une $DOP \leq 1$. L'historgramme des $DOP \leq 1$ pour tous les smolts, Figure 28, va permettre de trouver cette rupture. Une $DOP \leq 0,3$ (pointillés rouges) ou à $0,4$ (pointillés verts) permettrait de conserver une bonne quantité des données (respectivement 68,7% et 74,8 % des données brutes) tout en conservant une précision relativement bonne. Les histogrammes des DOP par smolt sont présentés dans l'annexe XI.

Il faut aussi s'assurer que chaque poisson conserve un nombre suffisant de données par rapport à son nombre de données initial. Pour cela, le pourcentage de données totales perdues entre une $DOP \leq 0,3$ et une $DOP \leq 0,4$ est calculé dans le Tableau 7. L'annexe X présente le nombre de données par smolt pour toutes les DOP, et les DOP inférieures ou égales à $0,4$ et $0,3$.

Tableau 7: Pourcentage de la différence du nombre de données pour une $DOP \leq 0,3$ et une $DOP \leq 0,4$

	Moins de 5% de différence	5% - 10% de différence	Plus de 10% de différence
Smolts concernés	26	63	2

Seulement deux smolts perdent plus de 10% de leurs positions. Entre une $DOP \leq 0,4$ et une $DOP \leq 0,3$, le premier smolt perd 22,6% de ses données, sachant qu'il en conserve 3 222 pour une $DOP \leq 0,3$. Pour le deuxième smolt, entre les deux DOP il y a une différence de 12% du nombre de données sachant qu'il garde 8 072 données pour une $DOP \leq 0,3$.

Afin d'avoir une idée visuelle de l'impact des DOP sur les positions, l'étude des positions de trois smolts aux $DOP \leq 0,3$ et $DOP \leq 0,4$ est réalisée. L'étude d'un des trois smolts sera présentée. Les autres sont présentés en annexe XII. Le smolt 42395 possède 1 047 données brutes, 399 données pour une $DOP \leq 0,4$ et 351 données pour une $DOP \leq 0,3$. Il fait donc partie des smolts possédant peu de données. La Figure 29 montre que pour une $DOP \leq 0,3$ l'essentiel de l'information est sauvegardé : la majorité des positions est conservée tandis que les positions les moins probables ne le sont pas. Prendre un seuil de DOP de $0,3$ permet donc de conserver un nombre raisonnable de données tout en ayant une précision relativement bonne.

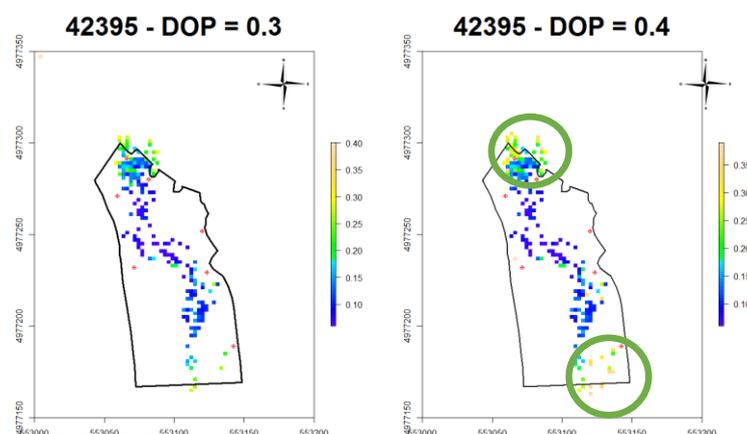


Figure 29: Positions conservées pour le poisson 42 395 aux $DOP \leq 0,3$ et $0,4$. Les points rouges représentent les positions des hydrophones. Les cercles verts soulignent les zones avec des positions de DOP comprises entre $0,3$ et $0,4$.

Par la suite, toutes les positions étudiées seront des positions dont la $DOP \leq 0,3$. Malgré la sélection d'une DOP relativement faible, certaines positions restent aberrantes (trop loin des limites du barrage et des hydrophones), certainement à cause d'une réverbération des émissions. Les résultats du test de positionnement, présenté en annexe VIII, montrent que le positionnement est de même qualité dans toute la zone avec une erreur de positionnement de 1,1 m en médiane. Pour pallier au problème de positions aberrantes, les données convenables sont extraites à l'aide du logiciel QGIS avec un masque reprenant les contours du barrage de Poutès. Ce masque est plus large de deux mètres afin de prendre en compte l'erreur de positionnement qui peut être réalisée (1,1 m d'erreur de médiane, par précaution, la largeur du masque est arrondie à 2 m de large). La moyenne de toutes les $DOP \leq 0,3$ a été calculée par pixel et représentée (Figure 30).

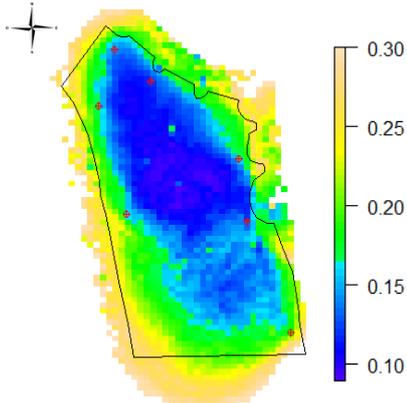


Figure 30: Carte de la DOP moyenne par pixel pour toutes les positions. Les points rouges représentent les hydrophones.

Sur la Figure 30, les valeurs de la DOP forment des nuages concentriques avec une valeur de DOP croissantes vers l'extérieur. Il en ressort que les DOP au centre de la zone (bleu foncé) sont très faibles. En revanche, sur le bord de la zone, la DOP, bien que toujours faible, est plus forte (verte et jaune). Les valeurs de DOP les plus fortes sont représentées en beige et correspondent pour la plupart à des positions en dehors de la zone.

La zone près de l'exutoire et de la prise d'eau a une DOP variant entre 0,15 et 0,30. Cette zone n'est pas la zone où la précision des positions est la plus forte.

Ceci peut être mis en relation avec la disposition des hydrophones dans cette zone. Sur la Figure 31, les hydrophones sont reliés par la triangulation de Delaunay dans QGIS. Ceci permet de voir comment ils sont reliés et dans quelle zone. De plus, chaque position a été calculée à l'aide d'un certain nombre d'hydrophones qui ont reçu l'émission de la position. Afin de connaître les bonnes zones de réception des hydrophones, la carte du nombre d'hydrophones moyen qui ont permis de calculer une position dans un pixel est tracée (Figure 32).



Figure 32: Emprise des hydrophones dans la retenue (QGIS)

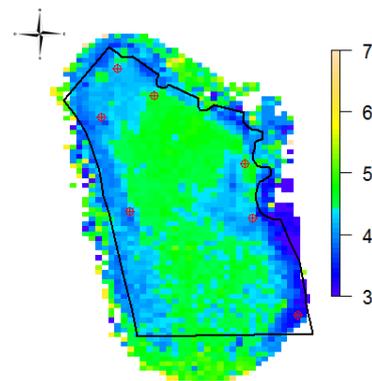


Figure 31: Nombre d'hydrophones qui détectent une position en moyenne par pixel. Les points rouges représentent les hydrophones.

Sur la Figure 32, la zone où les émissions sont entendues par le plus d'hydrophones se trouve au milieu de la zone du barrage (5 hydrophones en moyenne). Les zones sur le long des bordures du barrage sont les zones où les moins d'hydrophones entendent les émissions. Ces zones semblent correspondre à la zone où les hydrophones sont reliés par la matrice de Delaunay (Figure 31).

2. Les zones de présence dans la retenue



Figure 33: Trajectoire du smolt 30994 (402 positions). Les points orange représentent les positions des hydrophones.

Une fois les positions avec une précision convenable sélectionnées, il est possible de regarder les trajectoires des smolts dans QGIS. Pour avoir une représentation visuelle, la trajectoire d'un smolt ayant peu de positions est tracée sur la Figure 33.

Le smolt 30944 (Figure 33) arrive en rive droite sur le barrage où il semble hésiter et chercher son chemin. Il part ensuite vers l'exutoire et le plan de grilles de la prise d'eau. Une fois dans la zone du plan de grilles et de l'exutoire, il semble de nouveau hésiter et fait une boucle. Sa dernière position est détectée dans la zone de l'exutoire et du plan de grille. Il est toutefois impossible de dire s'il est passé par l'exutoire juste avec ces positions (la précision de la détection ne le permet pas). La station du TCC nous permet néanmoins de savoir qu'il y a été détecté et qu'il est donc passé par l'exutoire.

Pour synthétiser quelles sont les zones explorées par les smolts, une carte représentant le pourcentage de smolts (parmi les smolts présents dans la zone de la retenue) passés dans chaque pixel permet de mettre en avant quelles zones de la retenue sont beaucoup fréquentées par les smolts.

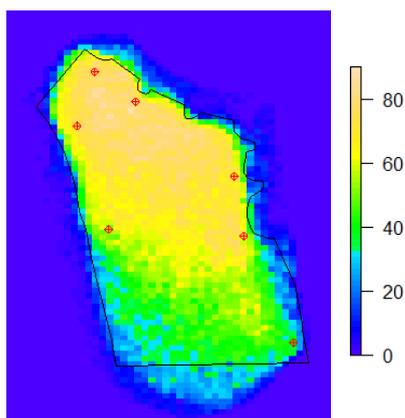


Figure 34: Pourcentage de smolts détectés par pixel (sur les 91 smolts présents au barrage). Les points rouges représentent les hydrophones.

La Figure 34 montre que les smolts sont presque tous allés dans la zone de l'exutoire mais aussi le long du barrage en rive droite. Ils semblent avoir exploré toute la zone devant le barrage. De plus, les smolts arrivent majoritairement en rive droite.

La fonction kernel du package `adehabitatHR` de R permet de mettre en évidence les parties de la zone de la retenue dans lesquels les détections sont très nombreuses. La fonction de kernel est appliquée à chaque classe de profil définie dans la partie **IV-A-4.** et présenté dans la Figure 35.

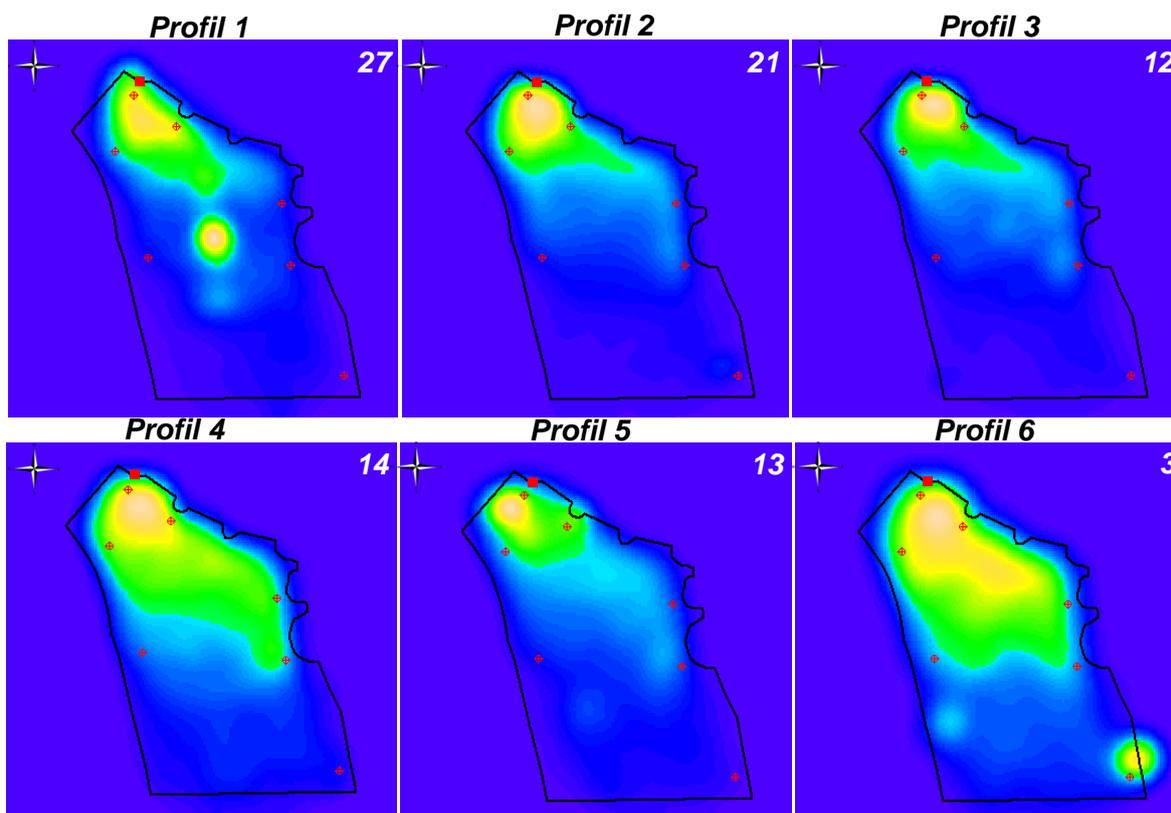


Figure 35: Représentations de la fonction d'utilisation de l'espace pour les 6 classes de smolts définies dans la partie III-A-4.. Les points rouges représentent les positions des hydrophones. Les carrés rouges représentent la position de l'exutoire.

Pour chaque classe, la zone la plus exploitée (la zone en jaune clair) se trouve à proximité de l'exutoire. La zone devant le barrage en rive droite est toujours exploitée, de manière plus ou moins importante selon les groupes toutefois. Les nuages dessinés pour les catégories 2 et 3 sont les mêmes : une zone très exploitée à proximité de l'exutoire avec une trainée un peu moins exploitée le long du barrage. Ces deux groupes sont composés de smolts actifs et se différencient par leur temps de résidence dans la retenue. Les nuages des groupes 4 et 6 sont plus étalés et occupent presque toute la zone du barrage.

Remarque : Sur ces graphiques, les notions de temps et de nombre de positions ne sont pas représentées. Par exemple, sur la carte du profil 1, le calcul est fait sur 51 540 positions alors que sur la carte du profil 6 l'interpolation est faite sur 14 673 positions. Ces cartes servent surtout à comprendre où les smolts se situent majoritairement dans la zone du barrage.

Remarque : Les cartes de probabilité de présence de chaque smolt sont présentées en annexe XIII.

3. Etude des tentatives dans la zone du barrage

L'étude des tentatives permet d'approfondir le comportement des smolts dans la retenue. Les seuils de temps entre deux positions pour séparer deux tentatives est de 30 min.

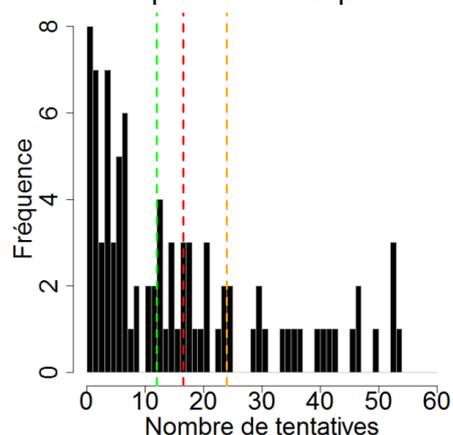


Figure 36: Histogrammes du nombre de tentatives. La moyenne est représentée en rouge, la médiane en verte et le troisième quartile en orange.

Le nombre de tentatives par smolt va de 1 à 54. En moyenne, un smolt fait 16,5 tentatives avec une médiane de 12 tentatives (Figure 36).

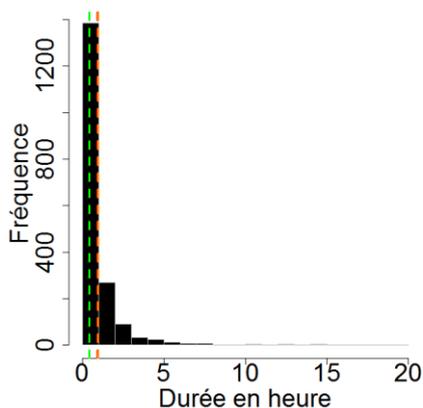


Figure 37: Histogramme de la durée des tentatives. La moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange.

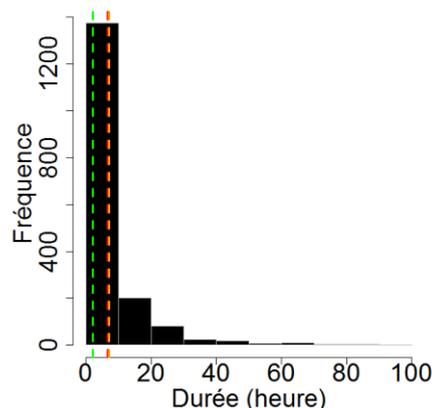


Figure 38: Histogramme des durées entre les tentatives. La moyenne est représentée en rouge, la médiane en vert et le troisième quartile en orange.

En ce qui concerne la durée des tentatives, elles sont relativement courtes et durent entre 3,6 secondes et 18h20. La médiane de la durée est de 27,6 minutes et le troisième quartile est de 1h06 (Figure 37). La durée entre deux venues varie de 30 minutes à 93 heures avec un troisième quartile à 7h12 et une médiane de 2h06 (Figure 38).

4. Influence de la saison

a. Utilisation de l'espace

Les profils ont permis de mettre en évidence une influence de la période de la saison. Les comportements des smolts sont étudiés suivant 4 périodes : avant le 31 mars, entre le 1^{er} avril et le 14 avril, entre le 15 avril et le 30 avril et après le 1^{er} mai.

Les nombres de smolts capturés et relâchés sur une période sont comptés ainsi que ceux qui sont détectés dans le TCC et donnent les pourcentages du Tableau 8 :

Tableau 8: Nombre et pourcentage de smolts présents au tambour et dans le TCC

Période	Du 14.03 Au 31.03	Du 01.04 Au 14.04	Du 15.04 Au 30.04	Du 01.05 Au 12.05
Smolts capturés et relâchés (sur 100) (Pourcentage)	90 (90%)	7 (7%)	3 (3)	0 (0%)
Smolts détectés dans le TCC (sur 60) (Pourcentage)	6 (10%)	3 (5%)	35 (58%)	16 (27%)

Le tambour est mis en place le 10 mars. Toutefois des smolts ne sont capturés qu'à partir du 14 mars. Au mois de mars, les smolts arrivent en groupe de 2 à 25 smolts avec une médiane de 7 smolts par groupe (10 groupes en tout). Au mois d'avril, ils arrivent par groupe de 1 à 3 smolts avec une médiane de 3 smolts par groupe (4 groupes en tout). Il faut noter que les smolts capturés au tambour pendant la troisième période sont capturés le 15 avril. Au tambour, l'essentiel des poissons est capturés en mars (90%). L'essentiel des poissons détectés dans le TCC le sont après le 15 avril (62%). La majorité des smolts dernièrement détectés dans la zone d'influence de la prise d'eau ont eu leur dernière détection avant le 1^{er} avril.

Sur la Figure 39, il est clair que les détections dans le TCC sont plus nombreuses après le 15 avril.

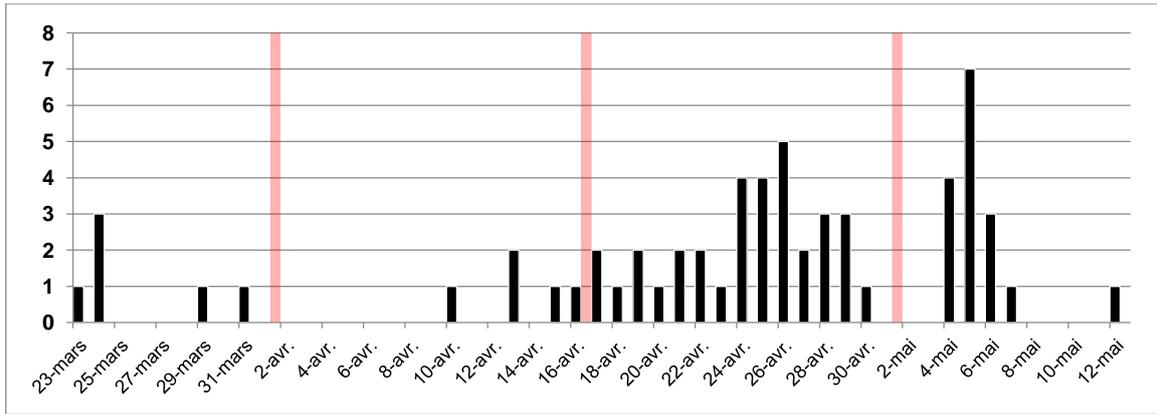


Figure 39: Histogramme des dates de détection dans le TCC. Les barres rouges séparent les 4 périodes définies plus haut.

Les positions de tous les poissons sont ensuite séparées suivant ces 4 groupes. La fonction de probabilité de présence est projetée sur ces points et donne les cartes suivantes :

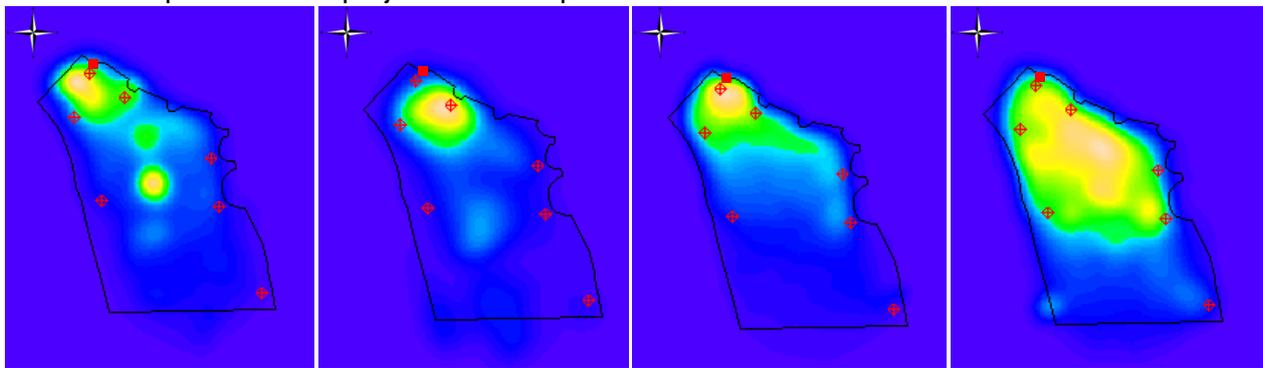


Figure 40: Exploitation de la zone du barrage en fonction des 4 périodes définies : (a) avant le 1er avril (48 652 positions) ; (b) du 1er au 14 avril (12 757 positions) ; (c) du 15 au 30 avril (272 656 positions) ; (d) après le 1er mai (39 491 positions)

La première carte (Figure 40 a) concerne les smolts qui sont arrivés dans la zone de la retenue assez rapidement après leur marquage. Tous ne sont pas passés : ces tentatives correspondent soit à des tentatives qui ont échouées soit à des tentatives réussies très rapidement. Le chemin qu'ils ont emprunté semble se dessiner. Le chemin tracé se retrouve un peu sur la deuxième carte (Figure 40 b). Sur les trois dernières cartes (Figures 40 b), c) et d)), une évolution de l'utilisation de l'espace est notable : le nuage d'utilisation de l'espace s'agrandit avec le temps. De plus, pendant la première moitié du mois d'avril les smolts ne semblent pas aller jusqu'à l'exutoire. Du 15 avril au 30 avril, ils vont jusqu'à l'exutoire et explorent aussi toute la zone devant le barrage. A partir du 1^{er} mai, les smolts explorent toute la zone du barrage.

Remarque : Un smolt peut avoir des positions sur plusieurs cartes s'il s'est présenté au barrage pendant différentes périodes.

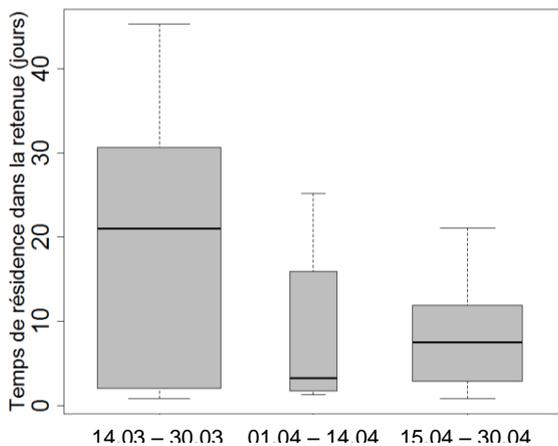


Figure 41: Boîtes à moustaches des temps de résidence dans la retenue en fonction de la date d'entrée dans la retenue. La largeur des boîtes est liée au nombre d'individu qu'elles représentent.

Afin de voir si la date d'entrée dans la retenue a un effet sur le temps de résidence dans la retenue, les boîtes à moustaches représentant le temps passé dans la retenue en fonction de leur date de première détection dans la queue de retenue sont tracées sur la Figure 41.

Les smolts arrivent tous dans la retenue avant le 1^{er} mai. La première période concerne 47 smolts, la deuxième 7 smolts et la troisième 37 smolts. Au cours de la première période, la médiane du temps de résidence dans la retenue est longue (20,99 jours) et le temps de résidence est très variable (de 0,8 à 45,63 jours). Dans la deuxième période, le temps de résidence médian est le plus faible de toute la saison

(3,3 jours) avec moins de variance dans les temps de résidence que pour la première période (de 1,3 à 25,2 jours). Toutefois, il est important de noter que beaucoup moins de smolts entrent dans la retenue à cette période. Dans la troisième période, le temps médian de résidence est de 7,5 jours. Il est plus court que celui de la première période bien que plus long que celui de la deuxième période. La variabilité du temps de résidence est plus faible (de 21h06 à 21 jours). Une analyse de variance permet de dire que ces trois périodes d'entrée dans la retenue ont des temps de résidence dans la retenue significativement différents ($P = 0,002247$).

b. Etude des tentatives

Dans cette partie, les individus étudiés sont les tentatives.

Tableau 9: Nombre et pourcentage de tentatives totales et réussies par période en fonction de la date d'initiation de la migration

Période	Du 14.03 Au 31.03	Du 01.04 Au 14.04	Du 15.04 Au 30.04	Du 01.05 Au 12.05	Total
Nombre de tentatives (Pourcentage)	146 (7,9%)	84 (4,6%)	1258 (68,1%)	358 (19,4%)	1846
Nombre de tentatives aboutissant à un passage dans le TCC (Pourcentage des tentatives)	6 (4,1%)	5 (5,9%)	32 (2,5%)	17 (4,7%)	60 (3,3%)

Le Tableau 9 met en évidence que les tentatives sont les moins nombreuses du 1^{er} avril au 14 avril (4,6% des tentatives) et sont les plus nombreuses sur la période du 15 avril au 30 avril (68,1% des tentatives). Les pourcentages représentant l'efficacité des tentatives sont du même ordre de grandeur : ils sont faibles entre 2,5 et 6%. Ce tableau permet de se rendre compte que l'augmentation des passages dans le TCC après la mi-avril est le fruit d'un accroissement des tentatives bien que les tentatives ne soient plus fructueuses.

La durée des tentatives est observée pour chaque période (Figure 42). Les médianes sont respectivement de 36, 18, 24, 24 minutes. Une analyse de la variance de ces durées de tentatives en fonction de la période montre qu'elles sont significativement différentes ($P = 1,504 \cdot 10^{-9}$).

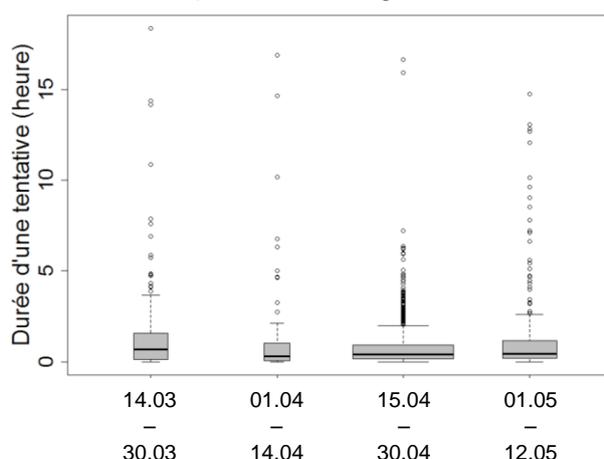


Figure 42: Boîtes à moustache de la durée d'une tentative en fonction de la période. La largeur des boîtes est proportionnelle au nombre de tentatives

Les tentatives ont été analysées au regard de la période du jour et de la saison (Figure 43).

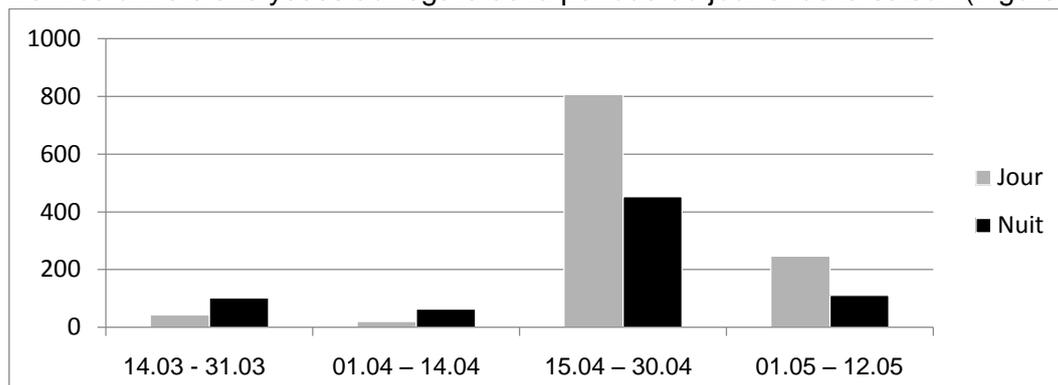


Figure 43: Histogramme de la fréquence des tentatives en fonction de la période de la journée et de la période de la saison

Comme vu dans la partie **IV-B-3-b.**, les tentatives sont beaucoup plus nombreuses dans la deuxième moitié du mois d'avril. Avant la mi-avril, les tentatives se déroulent le plus souvent pendant la nuit. Après la mi-avril, les tentatives se déroulent essentiellement pendant la journée et un peu moins la nuit. Un test du χ^2 confirme la dépendance entre ces deux variables ($P < 2,2 \cdot 10^{-16}$). Les combinaisons qui contribuent le plus à la non-dépendance des variables sont les deux périodes avant la mi-avril (du 14 au 30 mars et du 1^{er} au 15 avril). Pour ces deux périodes les données pour le jour sont beaucoup moins nombreuses et celles plus la nuit sont beaucoup plus nombreuses que celles attendues dans le cas d'une indépendance.

V. Discussion / Perspectives

A. Méthodologie et matériel utilisé

1. Taux de positionnement

Les hydrophones sont conçus pour enregistrer des positions dans un environnement acoustique calme, avec une vitesse de courant modérée et une profondeur d'eau suffisante. La zone du barrage répond parfaitement à ces critères. Les autres stations, situées en cours d'eau, bien qu'installées dans des zones répondant globalement à ces critères ne permettent pas un positionnement satisfaisant. L'écoulement au niveau de la station d'Alleyras et du TCC présente une vitesse modérée mais plus élevée que celle de la retenue, ce qui peut être une explication. La géométrie peut aussi en être la cause, les contraintes d'installation en cours d'eau empêchent d'avoir une zone bien recoupée. Les nombreuses détections ratées en Queue de retenue ne peuvent toutefois pas être expliquées par ces deux premières raisons. La faible profondeur d'eau ou des obstacles empêchant la communication entre les hydrophones peuvent en être la cause. Le détournement de U-Map en zone courante mais calme n'a pas apporté satisfaction, pourtant, il a été montré que du positionnement était possible en canal de fuite, mais avec du matériel HTI (Ingraham et al., 2014). La performance de ce dernier est sans doute supérieure.

2. Impact du marquage et taux de détection des smolts marqués

Sur les 100 smolts marqués et lâchés à Vabres, 93 smolts sont détectés à Alleyras. Ces smolts peuvent être considérés comme ayant bien récupérés de la chirurgie de marquage. Les 7 smolts non détectés à Alleyras peuvent être morts, avoir subi une prédation, avoir un émetteur qui ne fonctionne pas ou avoir rejeté leur émetteur (EDF, 2013). En 2014, seuls 49 % des smolts lâchés à Vabres (~20 km à l'amont) ont été détectés au barrage contre 91 % cette année. Toutefois, le fait que les juvéniles avaient été lâchés beaucoup plus en amont et qu'une partie des poissons était issue de la salmoniculture ont certainement joué un rôle dans le taux de smolts arrivés au barrage. En effet, les juvéniles de salmoniculture sont sélectionnés de manière arbitraire et ne sont peut être pas prêts à entreprendre leur migration tandis que les juvéniles capturés au tambour sont des juvéniles qui ont déjà commencé leur migration d'eux-mêmes. Toutefois, 1/3 des smolts relâchés ne reprend pas la migration immédiatement après leur remise à l'eau. Il se peut que ces smolts qui ont commencé leur migration aient été perturbés par le marquage. Une autre explication possible serait

que ces smolts ont initié leur migration suite à des conditions environnementales favorables et que l'arrêt de migration, produit par la capture au tambour et le marquage, suivi du temps de récupération dont ils ont eu besoin ne leur permettent de reprendre leur migration qu'à un moment où les conditions environnementales ne sont plus favorables. De plus, les conditions environnementales au cours de la période de migration où ils ne semblent pas très actifs n'ont pas été très stimulantes cette année (pas de crues ou de forts débits). Cela laisse envisager l'existence d'un seuil de débit qui permettrait le départ des smolts en migration lorsqu'ils ne sont pas très actifs.

3. Le calcul de U-Map

Pour calculer les positions des smolts, U-Map a besoin d'une valeur de salinité et d'une valeur de température de l'eau sur toute la période de l'étude (trois mois) afin de calculer une vitesse du son dans l'eau. Etant donné que la zone étudiée se situe à plus de 800 km de l'estuaire, au cours des trois mois d'étude, la salinité est considérée constante avec une valeur de 0 ppt. Comme vu dans la Figure 12, c'est une période où la température de l'eau est croissante et varie entre 3,5°C et 16,1°C. Il est important de vérifier l'impact de la température sur la vitesse du son calculée qui va influencer les positions calculées.

Une température de 3,5°C (température minimale sur la période étudiée) aurait conduit à une vitesse de 1 426,2 m.s⁻¹ et une température de 16,1°C (température maximale sur la période d'étude) aurait conduit à une vitesse du son dans l'eau de 1 468,9 m.s⁻¹ pour une salinité de 0 ppt. Les positions utilisées dans cette étude ont été calculées à partir d'une température moyenne de 9,8°C et une salinité de 0 ppt qui donnent une vitesse du son dans l'eau de 1 446,3 m.s⁻¹.

Ces vitesses du son dans l'eau sont peu différentes, l'impact de ces différences sur les positions calculées n'est néanmoins pas clair. Afin de connaître l'impact de la température de l'eau sur le positionnement, une étude approfondie sur les différences de positions calculées en fonction de la température utilisée pourrait être réalisée pour connaître la sensibilité du positionnement en lien avec la température de l'eau. Toutefois, le logiciel U-Map est un logiciel adapté au suivi télémétrique, or ces derniers se font sur plusieurs semaines. De ce fait, le fabricant ayant choisi d'utiliser une seule température pour toute la période d'étude renforce l'idée d'un faible impact de cette température sur les positions calculées. Il serait néanmoins judicieux d'étudier et de quantifier cet impact.

B. Une saisonnalité dans l'activité des smolts perceptible dans l'initiation de la migration et différentes échelles spatiales

La saisonnalité dans l'activité des smolts semble vraiment jouer un rôle important sur le comportement à l'échelle de toute la zone d'étude. Les profils mettent en avant un changement de comportement à la mi-avril pour la migration de dévalaison cette année. En effet, en amont du barrage, au tambour d'Alleyras, les 100 smolts sauvages, sont capturés et relâchés majoritairement avant le 1^{er} avril (90%) et les 10 derniers sont capturés entre le 1^{er} avril et le 15 avril (10%). Pourtant, à l'aval du barrage, quelques smolts sont détectés dans le TCC entre le 14 mars et le 1^{er} avril (18,3% des smolts détectés dans le TCC), aucun entre le 1^{er} et le 15 avril, 49 smolts après le 15 avril (81,7% des smolts détectés dans le TCC). Il semblerait que les smolts migrent passivement avant la mi-avril puis deviennent actifs. En effet, la première période où 90% des smolts sont marqués et lâchés et seulement quelques smolts arrivent dans le TCC peut s'expliquer par le fait que les smolts migrent passivement et que le peu de smolts qui passent dans le TCC sont des smolts qui ont dû être entraînés par le courant produit par l'exutoire. Le peu de passages enregistrés dans le TCC pendant la deuxième période peut s'expliquer par le fait que peu de smolts sont marqués et lâchés dans cette période (7) et que tous les smolts de la première période sont soit déjà passés dans le TCC, soit attendent passivement la mi-avril pour essayer de nouveau de trouver l'entrée de l'exutoire. A partir de la mi-avril (3^{ème} et 4^{ème} périodes), beaucoup de smolts empruntent l'exutoire (81,7% des smolts qui empruntent l'exutoire), ce qui est en lien avec l'hypothèse d'augmentation de l'activité des smolts à partir de la mi-avril. Ceci fait écho au « déstockage des migrants » relevé à Chanteuges dans l'étude du CNSS en 2013 et 2014 (CNSS,

2013 ; CNSS, 2014). Contrairement à ce que ces rapports ont révélé en 2013 et 2014, le pic de dévalaison noté à Alleyras ne l'a pas été à la vidéo ou en aval du barrage dans le TCC. Ceci peut probablement s'expliquer par le plus faible nombre de smolts capturés au tambour cette année (25 au maximum contre plus de 200 en 2014) ou encore par des conditions environnementales moins favorables que les années précédentes (débit et/ou température). D'après Riley (2007), la migration de dévalaison se composerait de 2 parties : une partie initiale où le juvénile est encore au stade de tacon, solitaire, et migre tout en faisant face au courant avec un comportement rhéotactique positif; et une partie où le juvénile est au stade de smolt avec un comportement grégaire et un comportement rhéotactique négatif (Hansen & Jonsson, 1985). Dans le cadre de cette étude et des études de dévalaison entreprises par le CNSS en 2013 et 2014, il a été observé que des smolts voire des tacons peuvent être capturés en groupes conséquents, ce qui ne rejoint pas cette observation de Riley (2007). Peut être que dans la zone du Haut-Allier ainsi que dans les grands systèmes, étant donné que les juvéniles commencent leur migration plus tôt pour atteindre l'estuaire à temps, les juvéniles se trouvent entre les deux situations décrites par Riley (2007). Ils sont à un stade physiologique peu avancé mais commencent à adopter un comportement de migration à la faveur de conditions environnementales favorables, d'où l'observation de juvéniles en groupe au tambour cette année, en 2014 et en 2013 (CNSS, 2014). De plus, 36,6% des smolts présents dans la zone du barrage, lorsqu'ils sont capturés et remis à l'eau, attendent les alentours du 15 avril avant d'entreprendre de nouveau leur migration. Ces smolts ont pu être perturbés par le marquage ou ne plus être dans un événement environnemental favorable à leur migration lorsqu'ils étaient passifs. C'est pourquoi ils arrêtent leur migration de dévalaison et ne la reprennent que lorsqu'ils deviennent actifs après la mi-avril.

La température et le débit semblent liés à l'initiation de la migration de manière complexe. D'après Martin et al. (2009), l'activité de dévalaison est optimale entre 7,5°C et 13,5°C. Cette année, à la station d'Alleyras, la température de 7,5°C est atteinte le 12 avril qui correspond au deuxième pic de dévalaison détecté à Alleyras. En suivant l'hypothèse de migration passive des smolts avant la mi-avril et de migration active après, la température n'influence peut être pas le départ en migration des smolts lorsqu'ils sont passifs et jouerait un rôle important dans leur départ en migration lorsqu'ils sont actifs. Le débit, quant à lui, joue peut être un rôle essentiel dans le départ en migration des smolts lorsqu'ils sont passifs et un rôle moins important lorsqu'ils sont actifs.

La saisonnalité se retrouve aussi à l'échelle de la retenue pour les smolts qui se présentent dans la retenue avant la mi-avril. En effet, avant la deuxième moitié du mois d'avril, les smolts présentent trois types de comportement : soit ils franchissent le barrage à la première prospection, soit ils arrivent dans la retenue et attendent la mi-avril, soit ils arrivent dans la retenue et essaient de passer une ou peu de fois puis attendent la mi-avril en queue de retenue ou entre deux stations de détection. En tous les cas, ils ne se présentent plus au barrage avant la deuxième moitié du mois d'avril. Après la mi-avril, le comportement des smolts dans la retenue est essentiellement explorateur (profils) comme le montre la présence et l'augmentation de tentatives et d'allers-retours jusqu'en queue de retenue. Le temps de résidence dans la retenue est aussi un indicateur de l'effet de la saisonnalité sur le comportement des smolts. En effet, les smolts qui entrent dans la retenue avant le 1^{er} avril ont des temps de résidence dans la retenue plus variables mais aussi plus forts en moyenne. Ceci peut s'expliquer le franchissement de quelques smolts à la première prospection (temps de résidence court) et par la grande majorité des smolts qui reste bloquée dans la retenue. Il s'agit des smolts qui vont attendre la mi-avril pour de nouveau tenter de passer (ce qui s'illustre par un temps de résidence médian de 21 jours). Le temps de résidence des smolts qui sont entrés dans la retenue après le 15 avril est significativement plus court, conséquence de l'augmentation de leur activité.

Au niveau du barrage, l'effet du changement de comportement se fait également sentir. Les smolts qui passent en une ou peu de prospections sont arrivés dans la retenue entre le 14 mars et le 31 mars. Certes moins actifs, ces smolts réussissent toutefois à trouver l'écoulement les

entraînant vers l'exutoire. Les cartes d'occupation de l'espace permettent de bien souligner cet effet de la saisonnalité dans la zone du barrage. Les deux premières cartes semblent montrer le chemin emprunté par les smolts. Etant donné que les smolts migrent passivement au cours de cette période, ils se laissent certainement entrainer par le courant résiduel principal de la retenue ce qui les amène tous sur le même chemin. De plus, le nombre de tentatives enregistrés sur cette période ne représente que 12,5% des tentatives totales enregistrées de la saison. En revanche, les deux cartes présentant l'exploitation de la zone après la mi-avril affichent des nuages d'occupation plus éparpillés qui signifient que les smolts sont allés dans plus de zones. De plus, c'est au cours de cette période que la majorité des tentatives sont réalisées notamment entre le 15 avril et le 1^{er} mai. Il faut tenir compte du fait qu'après le 1^{er} mai, il n'y avait plus beaucoup de smolts marqués dans la retenue, d'où peut être la diminution du nombre de tentatives sur cette période. Ceci souligne le phénomène de migration active et le fait que les smolts cherchent activement l'entrée de l'exutoire dans cette période.

Avant la mi-avril les tentatives se déroulent essentiellement la nuit alors qu'après la mi-avril, la tendance s'inverse et les tentatives se déroulent essentiellement le jour. Cette modification du comportement est retrouvée en 2014. La vidéosurveillance en 2014 par exemple (LOGRAMI, 2014) : jusqu'au 7 mai inclus, 93,7% des passages se déroule pendant la nuit alors qu'après le 8 mai, 76,4% des passages sont diurnes. Il a été mis en évidence, que la vue des poissons leur permet de s'orienter et que la perte de repère visuel a pour effet que le poisson est plus enclin à se laisser entrainer par les courants naturels ou artificiels (Landry & Grondin, 1992). Ceci pourrait expliquer que lorsque les smolts migrent passivement avec un réhotactisme positif, ils migrent essentiellement la nuit car ils n'ont plus de repères visuels auxquels se raccrocher. Lorsqu'ils deviennent actifs après la mi-avril, ils optent pour un réhotactisme négatif, et ils migrent activement lorsqu'ils voient c'est-à-dire de jour.

Au vu de l'impact de la saisonnalité sur le comportement des smolts et de ces deux phases mises en avant, il serait intéressant d'étudier le stade physiologique des juvéniles tout au long de leur parcours afin de le mettre en relation avec leur comportement. Des tambours placés le long du site de l'étude permettraient d'étudier leur stade (poids, taille, livrée argentée des smolts ou marques noires des tacons...). Ceci permettrait peut être de voir une évolution du comportement face à l'éclairage de l'exutoire. En effet, il a été montré que la composition de l'œil des juvéniles de salmonidés n'est pas la même selon leur stade physiologique (nombre de bâtonnets et de cônes) (Muller & Simmons, 2008).

C. Un retard conséquent au niveau de la retenue de Poutès

Les zones courantes, telles que les zones entre Vabres et la queue de retenue et la zone du TCC, ne sont pas celles qui semblent poser problème au cours de la dévalaison des smolts. Les temps de transit sont inférieurs à deux jours en médiane (1,7 jours entre Vabres et Alleyras, 2h24 entre Alleyras et la queue de retenue, 43 min entre l'entrée dans l'exutoire et le TCC). De plus, les temps en amont du réservoir sont biaisés et augmentés par les smolts qui attendent avant de reprendre leur migration. Le passage rapide des smolts le long de ces tronçons peut s'expliquer par les vitesses de courants fortes qui peuvent entrainer et guider les smolts (Enders et al., 2012).

Bien que la retenue mesure 3,418 km de long et que la distance entre Vabres et la queue de retenue est de 4,142 km, les smolts ont besoin de beaucoup plus de temps pour traverser la retenue (9,3 jours en médiane) que pour transiter de Vabres à la queue de retenue (2,8 jours en médiane). Avec une vitesse médiane de $1,94 \text{ cm.s}^{-1}$, les smolts devraient pourtant parcourir cette distance en moins de 2 jours. Ce tronçon semble donc produire un délai sur le temps de transit des poissons. Les smolts transitant 9 jours en médiane dans la retenue au lieu des 2 jours, qui ont été calculés avec la vitesse médiane sur ce tronçon, la retenue du barrage de Poutès semble induire 7 jours en médiane de retard au cours de la migration. Cette vitesse médiane est certainement en dessous de la réelle vitesse de migration des smolts dans la retenue car elle inclut des poissons

ayant retardé leur migration. La valeur de 7 jours de retard est donc à considérer en connaissant ces limites.

Le retard de migration produit par la retenue peut s'expliquer par sa nature lacustre et ses écoulements lents voire inexistant, comme le montre Carr (1997). Ce retard s'explique par une désorientation des smolts dans la retenue qui se voit par la présence notable de tentatives voire d'allers-retours jusqu'en queue de retenue. Un peu moins de deux tiers des smolts font au moins un aller-retour jusqu'en queue de retenue (64,8% des smolts présents dans la zone du barrage). Bien qu'il ne soit pas possible de le savoir avec les données actuelles, il est envisageable que les smolts remontent même plus loin que la queue de retenue. Toutefois, aucun ne remonte jusqu'à la station d'Alleyras. Le fait de faire des allers-retours jusqu'en queue de retenue n'est absolument pas naturel et montre bien la désorientation des smolts dans la retenue du barrage de Poutès (Travade et al., 2005).

Entre la queue de retenue et le barrage, deux smolts ne sont plus détectés. Ces smolts ont montré qu'ils supportaient bien le marquage, ils ont probablement été victimes des prédateurs présents (oiseaux et/ou poissons) (Travade et al., 2005).

Une tentative a été définie comme une venue au barrage, et deux tentatives sont séparées par un intervalle de temps de 30 min. Toutefois, un seuil de temps ne permet peut être pas de bien retracer le comportement des smolts. En effet, un smolt peut sortir de la zone de détection mais continuer à avoir un comportement explorateur ou rester dans la zone de détection du barrage alors qu'il n'est plus en exploration. Ces deux comportements donnent une fausse idée sur les tentatives, il faudrait déterminer un moyen de quantifier l'activité d'un poisson et se référer à cette valeur. En ce qui concerne les allers-retours jusqu'en queue de retenue, il est possible que des smolts fassent des allers-retours mais qu'ils fassent demi-tour avant la zone de la queue de retenue et ne serait donc pas détectés. Il serait intéressant de pouvoir quantifier les allers-retours, les zones où les smolts font demi-tour, ainsi que d'essayer d'expliquer ce qui leur fait faire demi-tour (est-ce qu'ils font demi tour dès qu'ils sentent un courant qui les ramène vers le barrage par exemple). Une possibilité d'amélioration de l'étude des tentatives et des allers-retours serait d'augmenter le nombre d'hydrophones et de les placer dans toute la retenue pour faire du positionnement à grande échelle. Cela permettrait de connaître les déplacements exacts de smolts : de savoir s'ils sont en mouvement ou s'ils attendent vraiment une date, jusqu'où le comportement de tentative peut être observé (quand ils cherchent à passer par l'exutoire), les zones où ils font leurs allers-retours...

Le passage des smolts dans la retenue entraîne un retard de migration de 7 jours approximativement (9,3 jours de transit en médiane dans cette zone). Etant donné les courtes fenêtres physiologiques et environnementales (partie **II-C-1**) pendant lesquelles il leur est possible de rentrer en mer, ce retard, combiné à la présence d'autres obstacles le long de l'axe (cumulant ainsi les retards) pourrait avoir des conséquences importantes sur la survie des smolts et leur entrée en mer.

D. Comportement dans la zone du barrage et sortie de la retenue

A l'exception de deux smolts qui ont certainement été prédatés, tous les smolts présents à la queue de retenue se présentent au moins une fois au barrage.

La station du TCC sert ici à quantifier le nombre de smolts passés par l'exutoire. Sur les 93 smolts détectés à Alleyras, les 2/3 sont passés par l'exutoire (détectés dans le TCC). Bien que cette étude n'ait pas pour but de qualifier l'efficacité de l'exutoire, il est possible de la calculer. L'efficacité de l'exutoire, telle qu'elle a été calculée dans les expérimentations de radiopistage (Bach et al., 2004), est calculée en faisant le rapport du nombre de smolts passés par l'exutoire sur le nombre de smolts passés par l'exutoire et la prise d'eau. Ici, le nombre de smolts réellement passés par la prise d'eau n'est pas connu. L'estimation la plus pessimiste correspond aux 16 smolts dont la dernière détection se trouve dans la zone d'influence de l'exutoire et de la prise d'eau, sachant que sur ces 16 smolts certains ont pu être prédatés devant l'entonnement de l'exutoire, phénomène qui a été très observé (Bach et al., 2004), ou ils sont peut être passés par l'exutoire et ont été prédatés

à sa sortie par exemple. Cette année, l'efficacité de l'exutoire est égale ou supérieure à 79%. L'efficacité de l'exutoire mesurée avec la manipulation de radiopistage de 2004 est de l'ordre de 90% (Bach et al., 2004). Elle est donc supérieure à l'efficacité mesurée cette année, sachant que celle calculée dans cette étude est une efficacité minimale (c'est-à-dire que les 16 smolts détectés dans la zone d'influence de l'exutoire et de la prise d'eau sont considérés être passés par la prise d'eau). Avec une efficacité égale ou supérieure à 79% en 2015 et proche de 90% en 2004, cet exutoire est considéré comme très efficace (Bach et al., 2004).

La carte du pourcentage de smolts passés dans chaque pixel de la zone du barrage a permis de mettre en avant que toutes les zones du barrage sont exploitées par la majorité des smolts. Les cartes d'utilisation de l'espace montrent cependant que la zone de prospection principale est la zone aux alentours de l'exutoire. Les smolts prospectent donc partout, le plus souvent près de l'exutoire. Travade et al. (2005) ont montré que bien qu'ils prospectent essentiellement devant la zone de l'exutoire, les smolts semblent réticent à l'emprunter ce qui entrainerait le retard de migration observé (3,3% des tentatives se soldent par un passage). La zone devant l'exutoire est soumise au courant produit par le débit d'eau passant par l'exutoire mais aussi par l'attraction du débit prélevé par la prise d'eau. Bien qu'attirés par le courant dans cette zone, les smolts sont visiblement dérangés par la courantologie (accélération ou directions des écoulements).

Pour essayer d'expliquer le comportement des smolts dans la zone du barrage ou même encore plus précisément dans la zone de l'exutoire, il serait intéressant de regarder dans quelle zone ils changent de direction, pour aller vers l'exutoire ou pour s'en éloigner, à quel moment de la journée, de la saison. Un moyen pour répondre à ces questions serait d'identifier les points de changement de trajectoire. Plusieurs méthodes de trajectométrie visant l'étude de ces « change points » ont été développées dont celle de Gurarie et al. (2009) basée sur la modélisation du produit de la vitesse et de l'angle de changement de direction (son cosinus et son sinus). Les variations des moyennes, des écart-types et des coefficients d'autocorrélation permettent de qualifier les changements de direction selon qu'il s'agisse d'un mouvement d'accélération, d'un mouvement erratique ou encore d'un brutal changement de direction. Le package BCPA (Behavioral Change Point Analysis), dont la première approche des données est présentée dans l'annexe XIV, pourra permettre de trouver, d'extraire et d'étudier ces « change points ». Une fois les « change points » extraits des trajectoires, il faudrait étudier leur répartition spatiale, puis leur répartition en fonction de la saison, en fonction de la période de la journée...

E. Le devenir des smolts

Il semble y avoir plusieurs possibilités de devenir pour les smolts. Les radiopistages de 1999 et 2004 réalisés par EDF mettent en avant trois voies empruntables pour les smolts : l'exutoire, les vannes de crues et les turbines (Travade et al., 2005). Les smolts qui sont détectés dans la zone du TCC sont forcément passés par l'exutoire. D'après les cartes de répartition de la DOP moyenne et du nombre d'hydrophones qui reçoivent une émission, pour les smolts qui ont leur dernière détection dans la zone de la prise d'eau, il est impossible de dire s'ils sont passés par l'exutoire ou la prise d'eau. De plus ces poissons ont aussi pu être prédatés. Les smolts dont la dernière détection se trouve au milieu de la zone ont très certainement été prédatés (6,5% des smolts « perdus » dans la retenue). Les smolts dont la dernière détection est en queue de retenue ou au bout de la zone du barrage sont soit prédatés (Travade et al., 2005). Dans les trois cas précédents, il est aussi possible que l'émetteur du poisson est cessé de fonctionner.

Un juvénile détecté dans le TCC ou supposé passé dans la prise d'eau, peut ne pas être vivant à l'aval du barrage. En ce qui concerne ceux passés dans le TCC, les profils des smolts 57171 et 37285 amènent à se poser des questions. Le temps de transit entre l'exutoire et la station du TCC est très faible (de l'ordre de l'heure) et ces smolts ont besoin d'un mois pour traverser cette zone bien que cette zone soit une zone où les smolts sont entraînés et n'ont aucune raison de s'arrêter. Ces smolts sont certainement morts et sont restés bloqués quelque part, un coup d'eau leur aura permis de sortir et de passer dans la station du TCC (3,3% des smolts qui passent). Parmi les

smolts qui sont dernièrement détectés dans la zone de la prise d'eau et de l'exutoire, certains peuvent donc être passés par l'exutoire et être restés coincés jusqu'au retrait des hydrophones d'où le fait qu'il ne soit pas détecté par la station du TCC.

Afin de résoudre ce problème de passage par la prise d'eau ou par l'exutoire, il faudrait mettre en place une station à la sortie de l'usine de Monistrol pour connaître le nombre de smolts qui passent réellement par la prise d'eau. De plus, afin de vérifier qu'aucun émetteur n'est resté dans la zone d'étude (poisson mort ou prédaté, émetteur rejeté...), il serait intéressant de passer dans toute la zone d'étude avec un hydrophone relié directement à l'ordinateur et d'observer en temps réel les émissions qu'il reçoit, pendant la période où l'émetteur est encore actif. S'il reçoit les émissions d'un émetteur réellement présent (pas des faux-positifs), les émissions seraient observées toutes les 5 secondes.

Finalement, au moins 66% des smolts présents dans la zone du barrage sont passés par l'exutoire contre 49% (17 sur 35 smolts) d'après le radiopistage de 2004 (Bach, 2004). Au maximum 17,6% des smolts sont passés par la prise d'eau contre 6% (1 smolt sur 17) en 2004 (Bach, 2004). Pendant le radiopistage de 2004 il y a eu des déversements ce qui a permis à 6% des smolts (1 smolt sur 17) de passer par les vannes de crues (Bach et al., 2004). Cette année il n'y a pas eu de déversements, par conséquent, aucun smolt du suivi n'a pu passer par les vannes de crues.

VI. Conclusion

Dans le cadre du suivi scientifique mis en place pour le projet de reconfiguration du barrage de Poutès et qui doit permettre d'en mesurer le gain environnemental, cette étude a permis une analyse approfondie du comportement des juvéniles de saumons atlantiques aux abords de la retenue avant la modification du barrage. Il en ressort que la retenue induit un retard de migration pour la majorité des juvéniles (9,3 jours de résidence dans la retenue en médiane au lieu des 2 jours supposés avec la vitesse médiane). Le retard de migration, et notamment celui cumulé en considérant une succession d'aménagements, diffère l'arrivée en estuaire et pourrait impacter la survie des smolts en mer. Le retard induit peut s'expliquer par une désorientation dans le réservoir et une réticence à emprunter l'exutoire de dévalaison qui sont mis en évidence par la présence de tentatives répétées pour franchir le barrage ainsi que des allers-retours jusqu'en queue de retenue. La désorientation induit elle-même une prédation accrue des juvéniles dans la retenue. Deux phases dans la migration des smolts ont été observées : une phase de migration passive où les smolts se laissent entraîner par les courants ; et une phase de migration active où les smolts présentent un comportement explorateur et montrent une activité (tentatives et allers-retours) plus grande. La transition entre les deux phases semble se produire aux alentours de la mi-avril. Les facteurs environnementaux (débits, température, lumière...) semblent jouer un rôle sur les comportements des smolts au cours de ces deux phases. Le comportement fin des smolts restent néanmoins un point essentiel à développer par la suite pour comprendre et expliquer la réticence que montrent les juvéniles à emprunter l'exutoire. De plus, il serait intéressant d'approfondir les facteurs influençant les deux phases de comportement décrites ci-dessus. Cette étude permettrait de comparer l'efficacité de passage et l'impact de la retenue du nouveau barrage de Poutès par rapport aux impacts du barrage actuel.

VII. Bibliographie

- Bach, J., Caut, I., Lelievre, M., & Viillard, J. (2004). Suivi de dévalaison 2004 des saumonnettes au droit du barrage de Poutès.
- Calenge, C. (2011). Analysis of Animal Movements in R: the adehabitatLT Package. R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria.
- Calenge, C. (2015). Home range estimation in R: the adehabitatHR package.
- Carmie, H. (2012). Dossier de presse plan saumon de Loire-Allier 2009-2013. CSP, Direction générale de l'environnement de l'aménagement et du logement Centre, Ministère de l'écologie et du développement durable, des transports et du logement.
- Carr, J. W. (1997). Downstream movement of pre-smolt in the Tobique River, 1996 tracking summary. 53 pp.

- CNSS. (2013). Suivi de la dévalaison dans la zone refuge à l'aide de tambours rotatifs à Alleyras et Chanteuges - Année 2013.
- CNSS. (2014). Suivi de la dévalaison dans la zone refuge à l'aide de tambours rotatifs à Alleyras et Chanteuges - année 2014.
- Cohendet, F. (1993). Le saumon de l'Allier: son histoire, sa vie, son devenir. Association internationale de défense du Saumon Atlantique.
- Davidsen, J., Svenning, M. A., Orell, P., Yoccoz, N., Dempson, J. B., Niemelä, E., Erkinaro, J. (2005). Spatial and temporal migration of wild Atlantic salmon smolts determined from a video camera array in the sub-Arctic River Tana. *Fisheries Research*, 74(1), 210-222.
- EDF. Renouvellement de concession de Monistrol d'Allier - Etude d'impact. Monistrol d'Allier (FR): EDF, 2013. 439 p.
- Enders, E. C., Gessel, M. H., Anderson, J. J., & Williams, J. G. (2012). Effects of decelerating and accelerating flows on juvenile salmonid behavior. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141(2), 357-364.
- Gurarie, E. (2013). Behavioral Change Point Analysis in R: The *bcpa* package.
- Gurarie, E., Andrews, R. D., & Laidre, K. L. (2009). A novel method for identifying behavioural changes in animal movement data. *Ecology Letters*, 12(5), 395-408.
- Hansen, L. P., & Jonsson, B. (1991). The effect of timing of Atlantic salmon smolt and post-smolt release on the distribution of adult return. *Aquaculture*, 98(1), 61-67.
- Hansen, L. P., & Jonsson, B. (1985). Downstream migration of hatchery-reared smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the River Imsa, Norway. *Aquaculture*, 45(1), 237-248.
- Hansen, L. P., & Jonsson, B. (1989). Salmon ranching experiments in the River Imsa: effect of timing of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt migration on survival to adults. *Aquaculture*, 82(1), 367-373.
- Hijmans, R. J. (2012). Introduction to the 'raster' package. Technical report, raster vignette.
- Hoar, W. S. (1976). Smolt transformation: evolution, behavior, and physiology. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 33(5), 1233-1252.
- Holst, J. (2012). Advancing understanding of Atlantic Salmon at Sea: Merging Genetics and Ecology to Resolve Stock-specific Migration and Distribution patterns. *SALSEA-MERGE*, NASCO.
- Imbert, H., Grafflin, V., & Dufour, S. (2013). Evidence of late migrant smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the Loire-Allier System, France. *Cybio*, 37(1-2), 5-14.
- Ingraham, J. M., Deng, Z. D., Martinez, J. J., Trumbo, B. A., Mueller, R. P., & Weiland, M. A. (2014). Feasibility of tracking fish with acoustic transmitters in the Ice Harbor Dam tailrace. *Scientific reports*, 4.
- Jonsson, B., & Jonsson, N. (1993). Partial migration: niche shift versus sexual maturation in fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 3(4), 348-365.
- Landry, J., & Grondin, C. (1992). Inventaire de quelques moyens utilisés pour attirer, éloigner ou orienter les poissons et évaluation d'une utilisation possible de ces systèmes en milieux humides. Entente cadre concernant un plan quinquennal pour la protection et l'aménagement des habitats.
- Larinier, M., & Travade, F. (2002). Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 364(Supplément), 181-207.
- Larsson, H. O., & Larsson, P. (1975). Predation on hatchery-reared smolt after release in the River Lulu, 1974. Swedish Salmon Research Institute - Report LFI MEDD 9/1975.
- Limburg, K. E., & Waldman, J. R. (2009). Dramatic declines in North Atlantic diadromous fishes. *BioScience*, 59(11), 955-965.
- LOGRAMI. (2014). Suivi de la dévalaison 2012 des saumoneaux au droit du barrage de Poutès. 57 p.
- Martin, P., Rancon, J., Segura, G., Laffont, J., Boeuf, G., & Dufour, S. (2012). Experimental study of the influence of photoperiod and temperature on the swimming behaviour of hatchery-reared Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts. *Aquaculture*, 362, 200-208.
- McCormick, S. D., Hansen, L. P., Quinn, T. P., & Saunders, R. L. (1998). Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(S1), 77-92.
- Characterization of gatewell orifice lighting at the Bonneville Dam second powerhouse and compendium of research on light guidance with juvenile salmonids. Pacific Northwest National Laboratory, 2008.
- ONEMA. Pourquoi rétablir la continuité écologique des cours d'eau? ONEMA, 2010. 23 p.
- Poe, T. P., & Rieman, B. E. (1988). Predation by resident fish on juvenile salmonids in John Day Headpond, 1983-1986 (Vol. Volume I - Final Report of Research).
- Riley, W. D. (2007). Seasonal downstream movements of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L., with evidence of solitary migration of smolts. *Aquaculture*, 273(2), 194-199.
- Roy R. (2014). Distribution spatiale et activité des poissons en milieu lacustre: impacts des facteurs environnementaux à partir d'une approche multi-échelle. Application à la retenue des Bariousses. Doctorat en écologie, 225 p.
- Ruggles, C. P. (1980). A review of the downstream migration of Atlantic salmon.
- Silverman, B. W. (1986). Density estimation for statistics and data analysis (Vol. 26). CRC press.
- Smith, R. T. (1938). Report on fish spilling and dropping, Ariel Dam. Field rep. To Wash. State Dep. of Fish. Cited in Ruggles 1980. A review of the downstream migration of Atlantic salmon. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 952.
- Thorpe, J. E. (1994). Reproductive strategies in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Aquaculture Research*, 25(1), 77-87.

- Travade, F., Bomassi, P., & Bach, J. (2005). Impact de l'aménagement hydroélectrique de Poutès-Monistrol (Allier) sur les poissons migrateurs. Bilan des études réalisées de 1983 à 2000. EDF, 83 p
- Tytler, P., Thorpe, J. E., & Shearer, W. M. (1978). Ultrasonic tracking of the movements of Atlantic salmon smolts (*Salmo salar* L) in the estuaries of two Scottish rivers. *Journal of Fish Biology*, 12(6), 575-586.
- Van Winkle, W. (1975). Comparison of several probabilistic home-range models. *The Journal of Wildlife Management*, 118-123.
- Winter, J. D. (1996). *Advances in underwater biotelemetry*. Fisheries techniques, 2nd edition. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 555-590.

VIII. Sitographie

- EOL. Encyclopedia of Life. <http://www.eol.org/pages/206776/details> (consulté le 18.05.2015)
- Encyclopaedia Universalis (2015). <http://www.universalis.fr/> (consulté le 18.05.2015)
- UICN (2013). UICN. <http://www.iucn.org/fr/> (consulté le 18.05.2015)
- Loire grandeur nature (2013). Plan Loire Grandeur Nature. <http://www.plan-loire.fr/fr/accueil/index.html> (2014) (consulté le 20.05.2015)
- Lotek (2015). Lotek Wireless. Fish and Wildlife monitoring. <http://www.lotek.com/> (consulté le 21.08.2015)
- Notre-planete.info (2015). Notre-planète.info. <http://www.notre-planete.info> (consulté le 21.08.2015)
- Rivernet (2015). Rivernet, le portail des rivières vivantes. http://www.rivernet.org/rn_f.htm (consulté le 20.05.2015)
- WoRMS. World Register of Marine Species. <http://marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=127186> (consulté le 18.05.2015)
- Ptaff (2015) Ptaff.ca. <https://ptaff.ca/> (consulté le 25.06.2015)

ANNEXES

- Annexe I** : Evolution des rivières à saumons en France du XVIII^{ème} siècle à nos jours
- Annexe II** : Evolution de nombre de smolts comptés au barrage de Poutès
- Annexe III** : Photographies extraites de la vidéosurveillance de l'exutoire du barrage de Poutès : un bécard et des smolts
- Annexe IV** : Nombre de smolts comptés à l'exutoire du barrage de Poutès et aux tambours en 2013
- Annexe V** : Fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D
- Annexe VI** : Tableau récapitulatif des smolts utilisés et de leur date de lâcher
- Annexe VII** : Profils migratoires des smolts par classe
- Annexe VIII** : Erreur et taux de positionnement : une étape préliminaire nécessaire à l'analyse
- Annexe IX** : Représentation des 100 dernières détections des smolts non détectés dans le TCC dont la dernière détection est dans la zone de la retenue avec le package adehabitatLT de R
- Annexe X** : Nombre de données dans la zone du barrage pour chaque smolt avec toutes les DOP, les $DOP \leq 0,4$ et les $DOP \leq 0,3$ ainsi que les pourcentages associés
- Annexe XI** : Histogrammes des $DOP \leq 1$ par smolt
- Annexe XII** : Cartes des positions de deux smolts pour les $DOP \leq 0,3$ et les $DOP \leq 0,4$
- Annexe XIII** : Sortie de la fonction kernel du package adehabitatHR de R par smolt, paramètre de lissage de référence
- Annexe XIV** : Première exploitation du package BCPA de R en utilisant la vitesse persistante.

Annexe I : Evolution des rivières à saumons en France du XVIII^{ème} siècle à nos jours

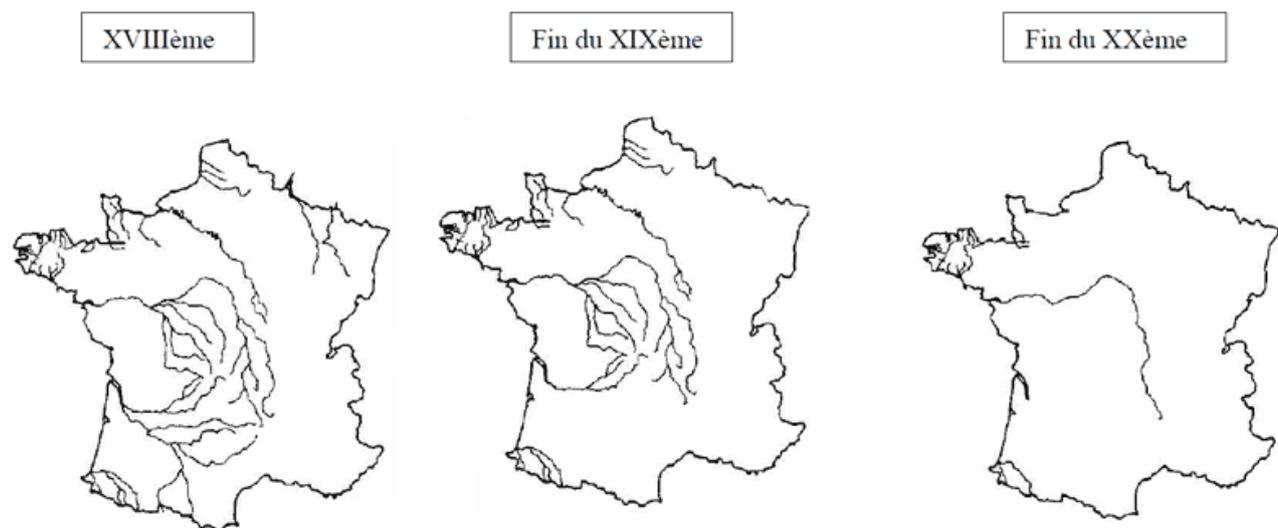


Figure 1 : Evolution des rivières à saumons en France du XVII^{ème} siècle à nos jours
Source : notre-planète.info

Annexe II : Evolution de nombre de smolts comptés au barrage de Poutès

Les smolts sont comptés à l'aide de la vidéosurveillance au niveau de l'exutoire du barrage de Poutès.

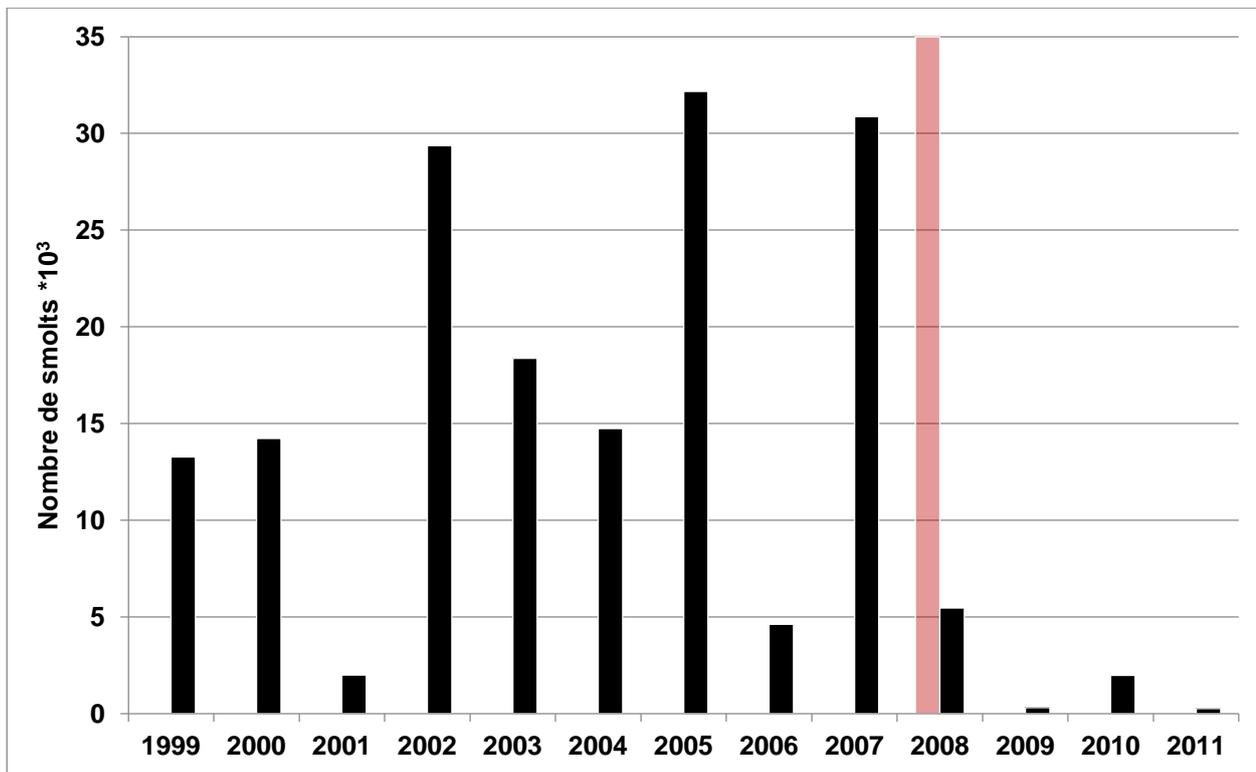


Figure 1 : Evolution du nombre de smolts comptés au barrage de Poutès par vidéosurveillance entre 1999 et 2011. La limite rouge représente le moment où la zone en amont de Langeac a été considérée comme zone refuge.

Source : EDF (2013)

En 2009, la zone en amont de Langeac a été considérée comme zone refuge : c'est-à-dire qu'il n'y a plus de déversements de juvéniles dans cette zone.

Annexe III : Photographies extraites de la vidéosurveillance de l'exutoire du barrage de Poutès : un bécard et des smolts

- ✓ Un bécard



- ✓ Des smolts



Annexe IV : Nombre de smolts comptés à l'exutoire du barrage de Poutès et aux tambours en 2013

En 2013, deux tambours de piégeage rotatifs ont été mis en place autour du barrage : un tambour en amont du réservoir à Alleyras et un tambour en aval du barrage à Chanteuges. Au niveau de l'exutoire, les smolts sont comptés par vidéo-comptage.

La Figure 1 montre le nombre de smolts comptés au tambour d'Alleyras (courbe bleu), au niveau de l'exutoire par vidéo-comptage (courbe verte) et au tambour de Chanteuges (courbe rouge) au cours du temps de début mars à fin mai.

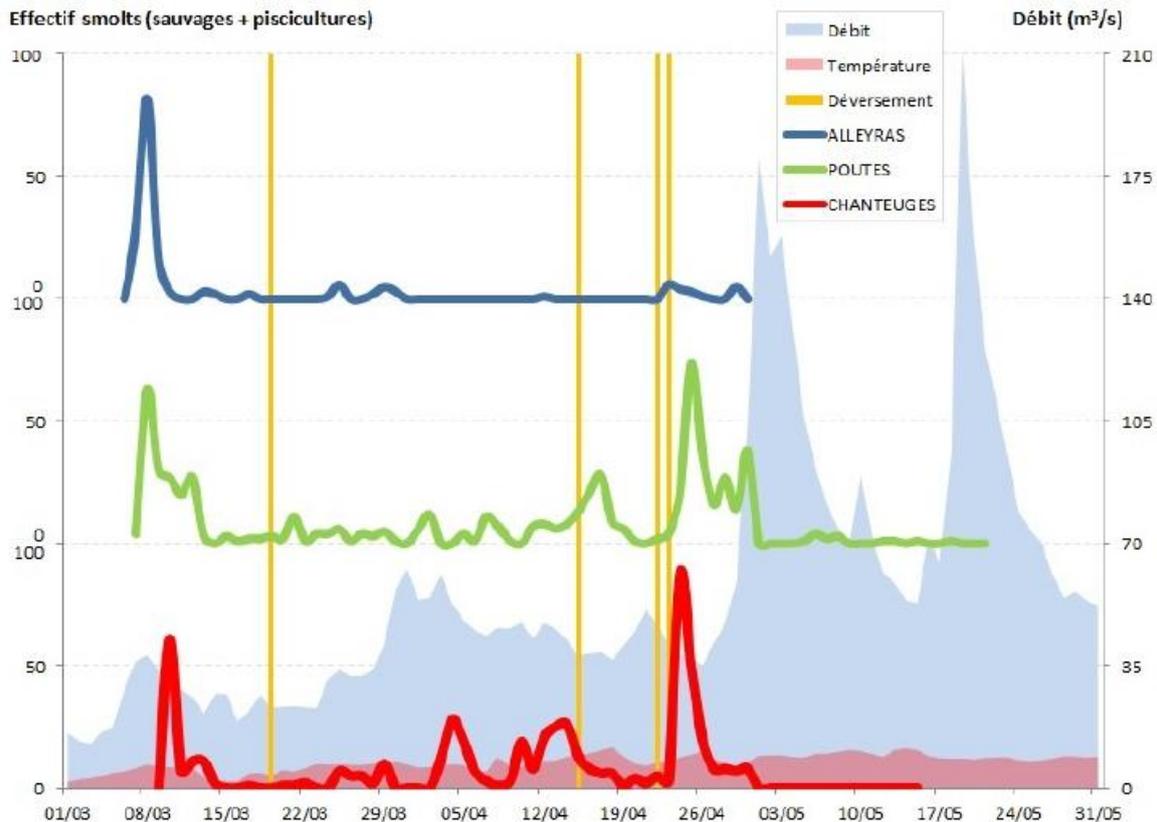


Figure 1 : Comptage des smolts en 2013 au tambour d'Alleyras (courbe bleu), à l'exutoire du barrage (courbe verte) et au tambour de Chanteuges (courbe rouge).

Source : CNSS (2013)

On note bien la présence du pic unique de dévalaison en mars à Alleyras qui se retrouve à Poutès et à Chanteuges. Puis en avril, on remarque la présence des différents pics de dévalaison qui correspondent au déstockage de la retenue de Poutès enregistrés à l'exutoire par la vidéo surveillance et à Chanteuges.

Annexe V : Fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D

La télémétrie acoustique 2D repose sur 2 éléments : un émetteur et un récepteur.

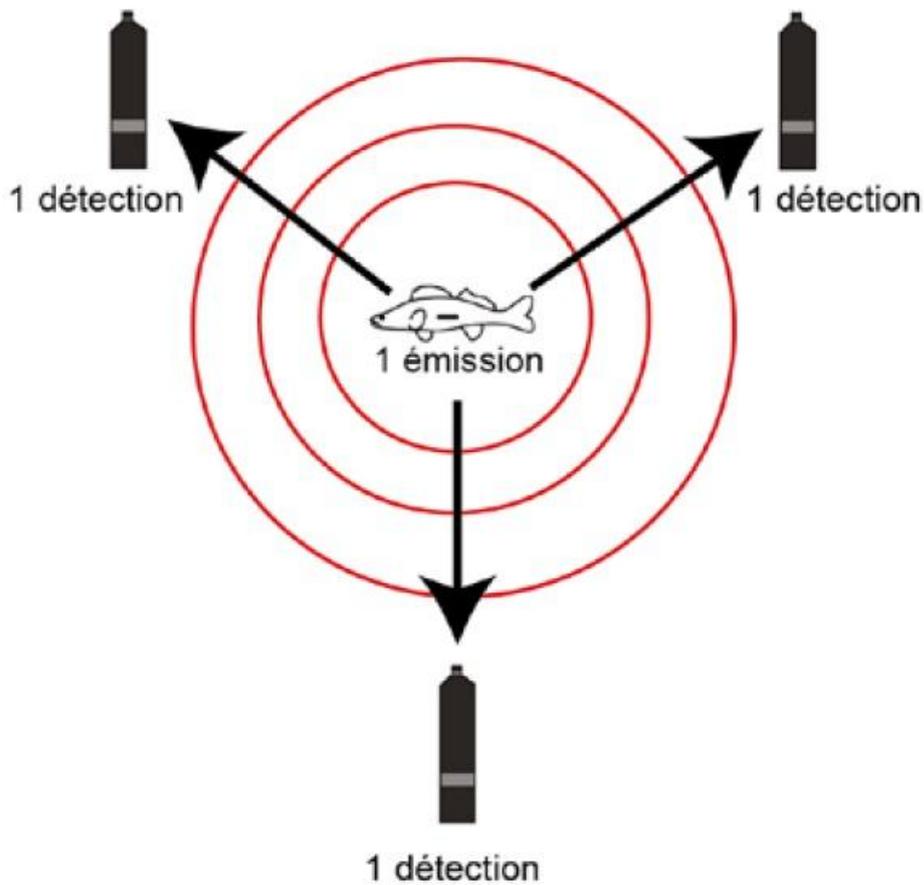


Figure 1 : Schéma du fonctionnement de la télémétrie acoustique 2D (Roy, 2014)

L'émetteur émet une onde sonore sous forme de pulse (toutes les 5 secondes dans notre étude) avec un identifiant unique. L'onde est représentée sous forme de cercles concentriques sur la Figure 1 et doit être entendue par un minimum de trois récepteurs.

Connaissant la vitesse de propagation du son dans l'eau et la position des trois récepteurs (ou plus), il est possible de calculer la position de l'émetteur par triangulation des données des récepteurs.

Annexe VI : Tableau récapitulatif des smolts utilisés et de leur date de lâcher

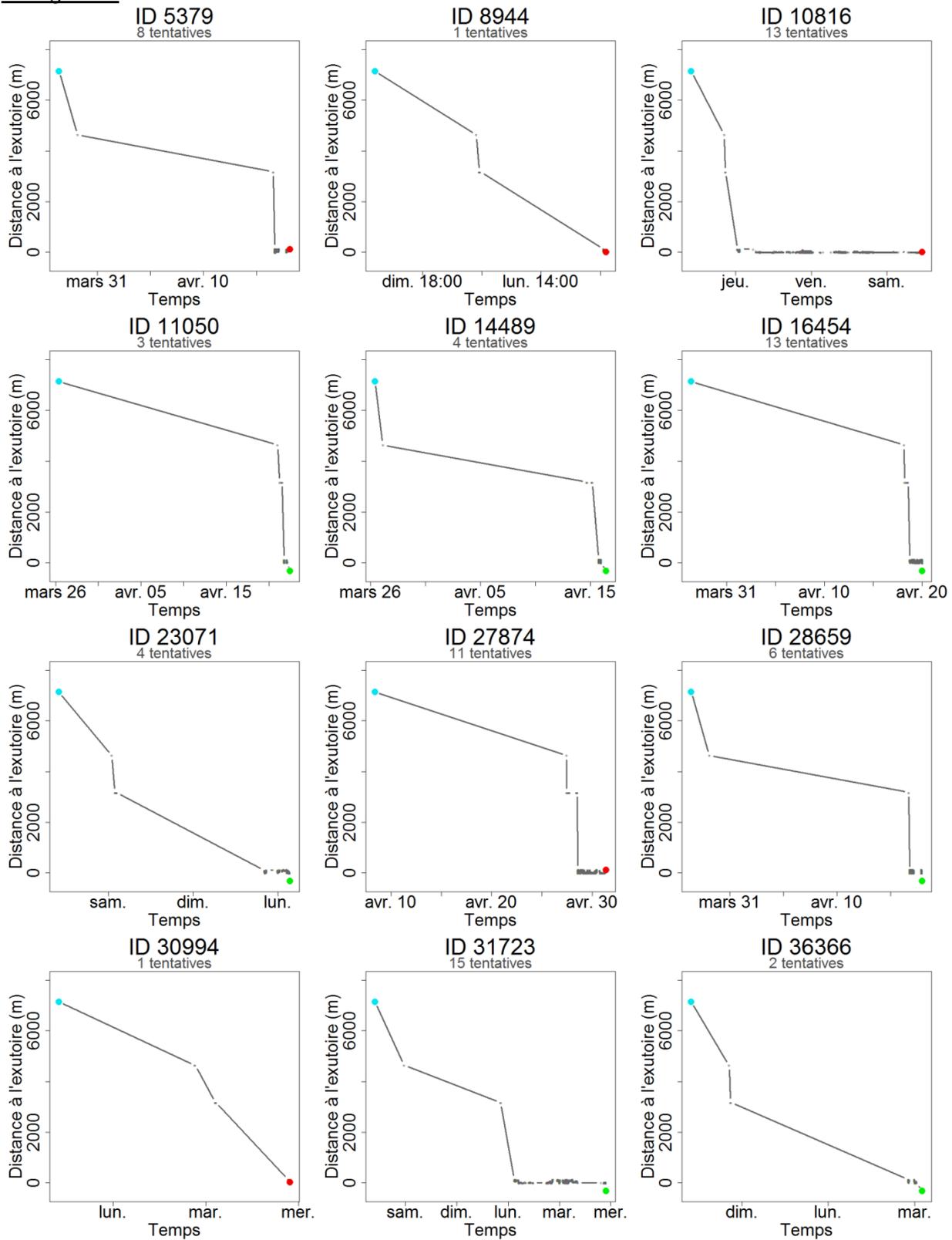
	Marquage	N° Lâché	Recapture au tambour (1)	Recapture au tambour (2)	Taille à la fourche (mm)	Taille totale (mm)	Poids (g)	Tag hexa	Tag dec
1	14/03/2015	1			127	138	20,6	BF4F	48975
2	14/03/2015	1			129	140	22,4	AE3B	44603
3	14/03/2015	1			138	150	25,2	6AF7	27383
4	18/03/2015	2			132	139	19,6	F718	63256
5	18/03/2015	2			148	156	31,6	2A40	10816
6	20/03/2015	3			136	142	24,7	7BEB	31723
7	20/03/2015	3			142	152	27,2	A59B	42395
8	20/03/2015	3			165	174	40,2	BDAB	48555
9	20/03/2015	3	26/03/2015		121	130	16,8	4B03	19203
10	20/03/2015	3			130	139	20,4	BC30	48176
11	20/03/2015	3			142	150	28,3	5A1F	23071
12	20/03/2015	3			120	127	15,4	E50D	58637
13	20/03/2015	3	21/03/2015		123	131	21	2E39	11833
14	20/03/2015	3			137	146	22,9	CC15	52245
15	20/03/2015	3			128	139	23,1	78DD	30941
16	20/03/2015	3	21/03/2015	23/03/2015	125	134	19,6	1204	4612
17	21/03/2015	4			169	179	43,5	8E0E	36366
18	21/03/2015	4			137	144	24,7	A46A	42090
19	21/03/2015	4	22/03/2015		144	155	29,7	C36F	50031
20	21/03/2015	4			155	164	36,3	2296	8854
21	21/03/2015	4			170	180	49	0690	1680
22	21/03/2015	4			130	137	21	C250	49744
23	21/03/2015	4			162	173	39,2	990D	39181
24	22/03/2015	5			117	126	16	7912	30994
25	22/03/2015	5			138	149	25,8	A992	43410
26	22/03/2015	5			112	122	13,7	F18D	61837
27	22/03/2015	5			130	140	20	C9DC	51676
28	22/03/2015	5			181	192	55,7	5C2F	23599
29	22/03/2015	5			136	145	26,6	BA86	47750
30	23/03/2015	6			136	145	25	9A50	39504
31	23/03/2015	6			132	141	21,3	AC92	44178
32	23/03/2015	6			129	136	19,9	9D71	40305
33	23/03/2015	6			127	136	21	6A3A	27194
34	23/03/2015	6			133	144	23,9	2DDD	11741
35	23/03/2015	6			132	141	23,7	21C9	8649
36	23/03/2015	6			135	144	23,8	04BD	1213
37	23/03/2015	6			141	152	26,3	4E9F	20127
38	23/03/2015	6			126	135	19,3	9EB6	40630
39	25/03/2015	7			127	135	20,7	4F61	20321
40	25/03/2015	7			132	141	23,5	F1BF	61887
41	25/03/2015	7			136	146	24,3	889B	34971

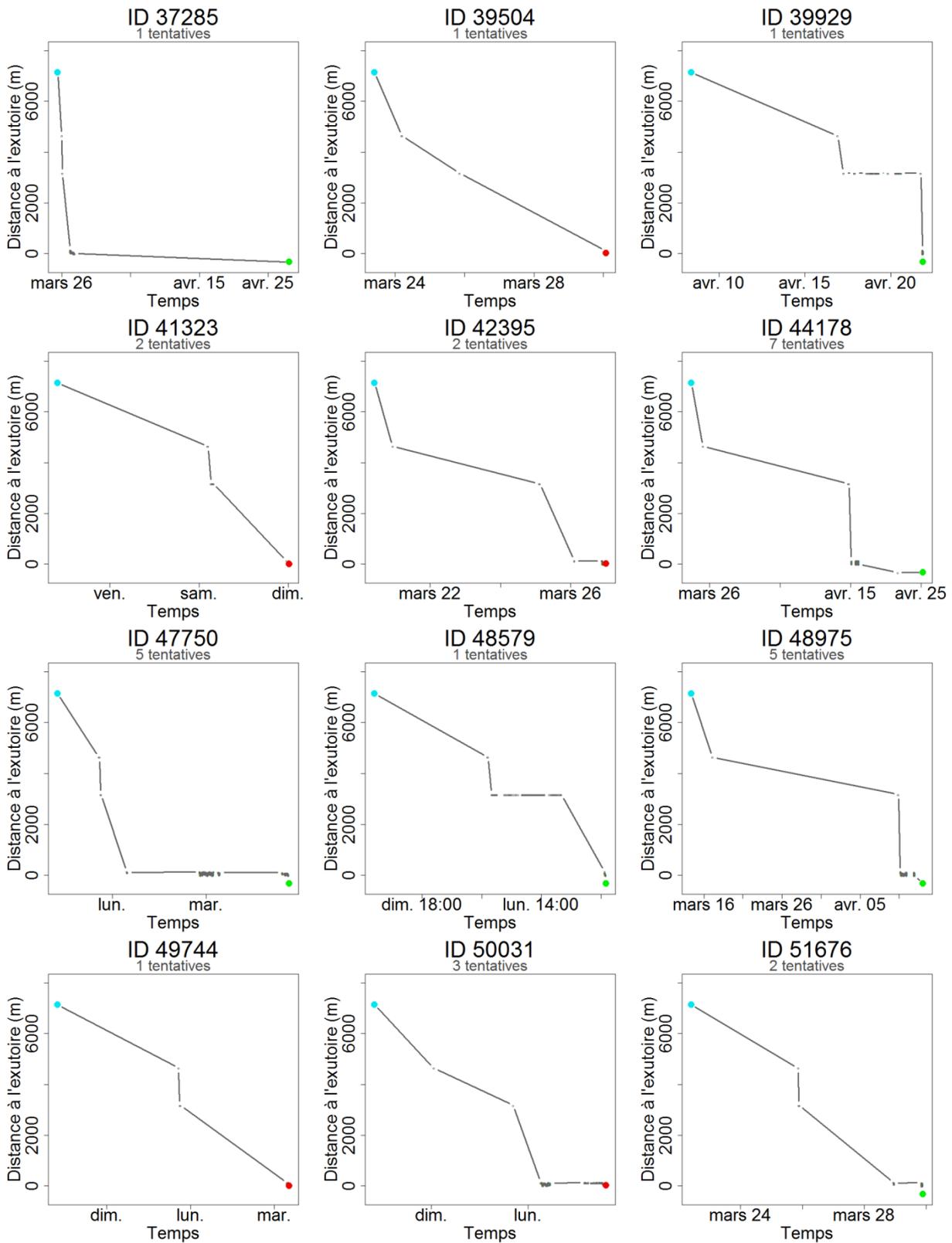
42	25/03/2015	7			128	137	20,7	680A	26634
43	25/03/2015	7			130	139	21,2	91A5	37285
44	25/03/2015	7			127	138	20,3	1A05	6661
45	25/03/2015	7	26/03/2015		129	137	19,8	81AD	33197
46	26/03/2015	8			190	203	60,3	DF48	57160
47	26/03/2015	8			162	172	37,4	6F96	28566
48	26/03/2015	8			153	162	36,2	2041	8257
49	26/03/2015	8			143	153	26,7	89BF	35263
50	26/03/2015	8			165	176	43,6	3FA4	16292
51	26/03/2015	8			174	184	49	1066	4198
52	26/03/2015	8			129	139	21,2	2B2A	11050
53	26/03/2015	8			140	148	25,9	A22D	41517
54	26/03/2015	8			156	167	34,6	866E	34414
55	26/03/2015	8			140	150	26,9	9477	38007
56	26/03/2015	8			167	179	43,4	4AC3	19139
57	26/03/2015	8			146	156	29,5	E4E0	58592
58	26/03/2015	8			139	149	24,9	A16B	41323
59	26/03/2015	8			130	138	21,6	3899	14489
60	26/03/2015	8			130	139	22,8	C235	49717
61	26/03/2015	8			164	174	40	F677	63095
62	26/03/2015	8			133	144	23,3	DDFA	56826
63	26/03/2015	8			148	157	31,8	C4C9	50377
64	26/03/2015	8			119	128	15	DF53	57171
65	26/03/2015	8	(28 ou 29/03/2015)		139	148	26,5	97B5	38837
66	26/03/2015	8			136	144	25,7	F7FA	63482
67	26/03/2015	8			135	144	25,1	A674	42612
68	26/03/2015	8			138	148	30,4	D9B7	55735
69	26/03/2015	8			133	142	23,4	A57B	42363
70	26/03/2015	8			135	144	23,6	95A4	38308
71	27/03/2015	9			123	133	17,3	5DE3	24035
72	27/03/2015	9			139	149	25,7	C976	51574
73	27/03/2015	9			135	145	25,5	6C4A	27722
74	27/03/2015	9			125	134	20	8D9C	36252
75	27/03/2015	9			139	147	26,6	10EE	4334
76	27/03/2015	9			137	147	25,3	CBFB	52219
77	27/03/2015	9			142	153	27,7	1503	5379
78	27/03/2015	9			134	144	23,2	EFB2	61362
79	27/03/2015	9			149	159	30,7	CF37	53047
80	27/03/2015	9			140	150	27,7	841A	33818
81	27/03/2015	9			157	168	35,6	4046	16454
82	27/03/2015	9			142	152	29,3	6FF3	28659
83	27/03/2015	9			131	140	21,7	56F6	22262
84	27/03/2015	9			136	146	26,2	E15E	57694
85	29/03/2015	10			169	181	41,7	F583	62851

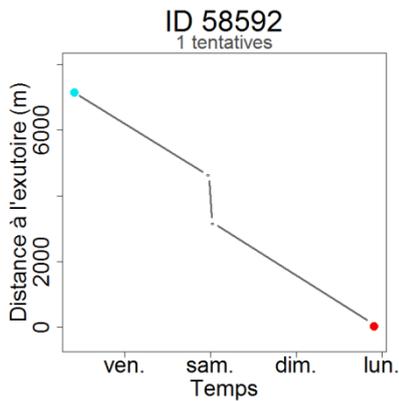
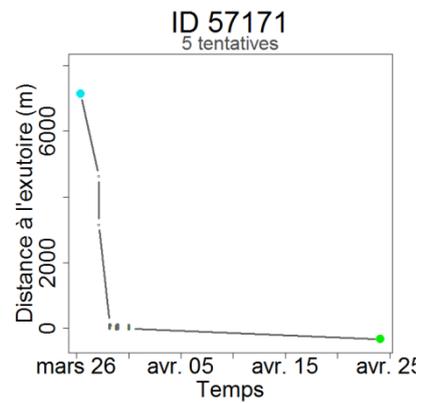
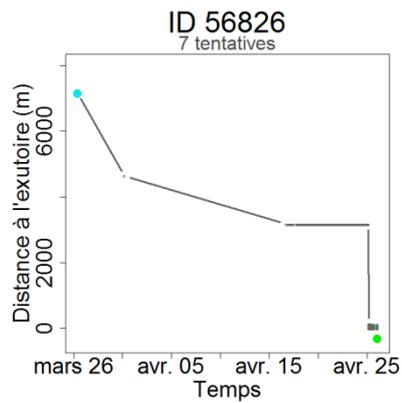
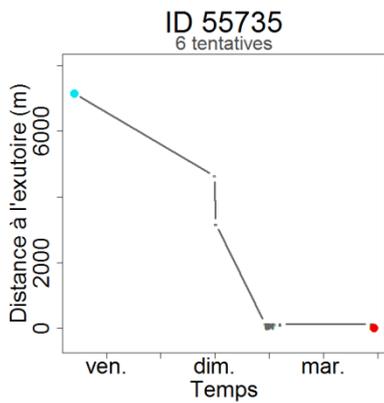
86	29/03/2015	10			140	149	26,8	8EA8	36520
87	29/03/2015	10			142	152	27,8	22F0	8944
88	29/03/2015	10			134	142	22	7469	29801
89	29/03/2015	10			136	146	24,1	B840	47168
90	29/03/2015	10			137	147	25,2	BDC3	48579
91	05/04/2015	11			152	161	33,9	C4F7	50423
92	08/04/2015	12			180	191	53,8	9BF9	39929
93	08/04/2015	12			156	166	35,5	2F43	12099
94	08/04/2015	12			144	154	29	6CE2	27874
95	15/04/2015	14			185	197	53,7	E2A5	58021
96	12/04/2015	13			169	179	45,8	9F5B	40795
97	12/04/2015	13			140	150	26,7	F4B9	62649
98	12/04/2015	13			150	160	33,1	7CD8	31960
99	15/04/2015	14			157	167	37	54F0	21744
100	15/04/2015	14			143	153	28,1	C674	50804

Annexe VII : Profils migratoires des smolts par classe

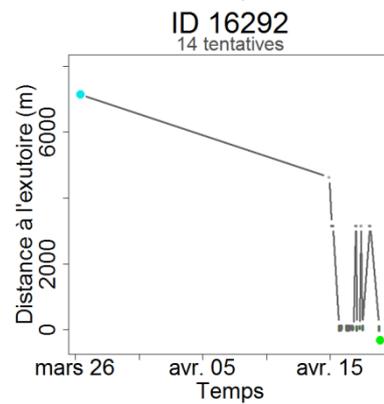
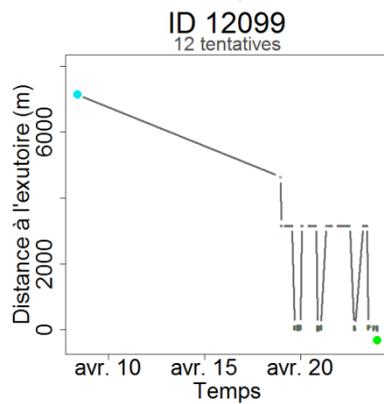
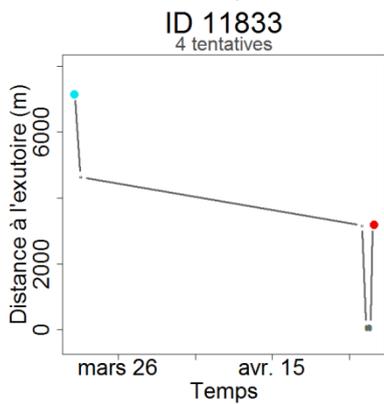
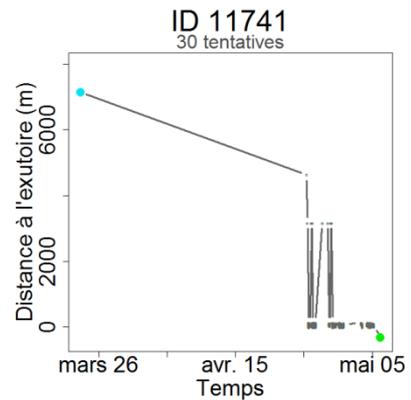
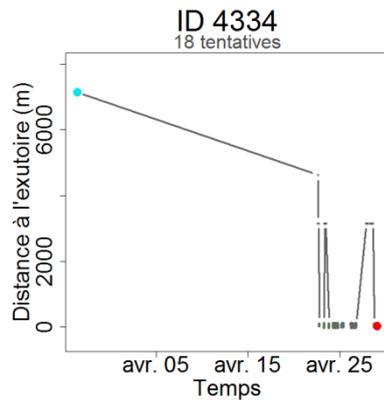
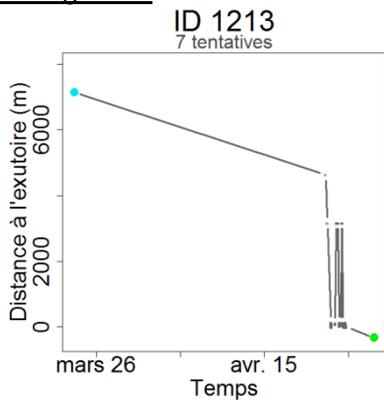
✓ Catégorie 1

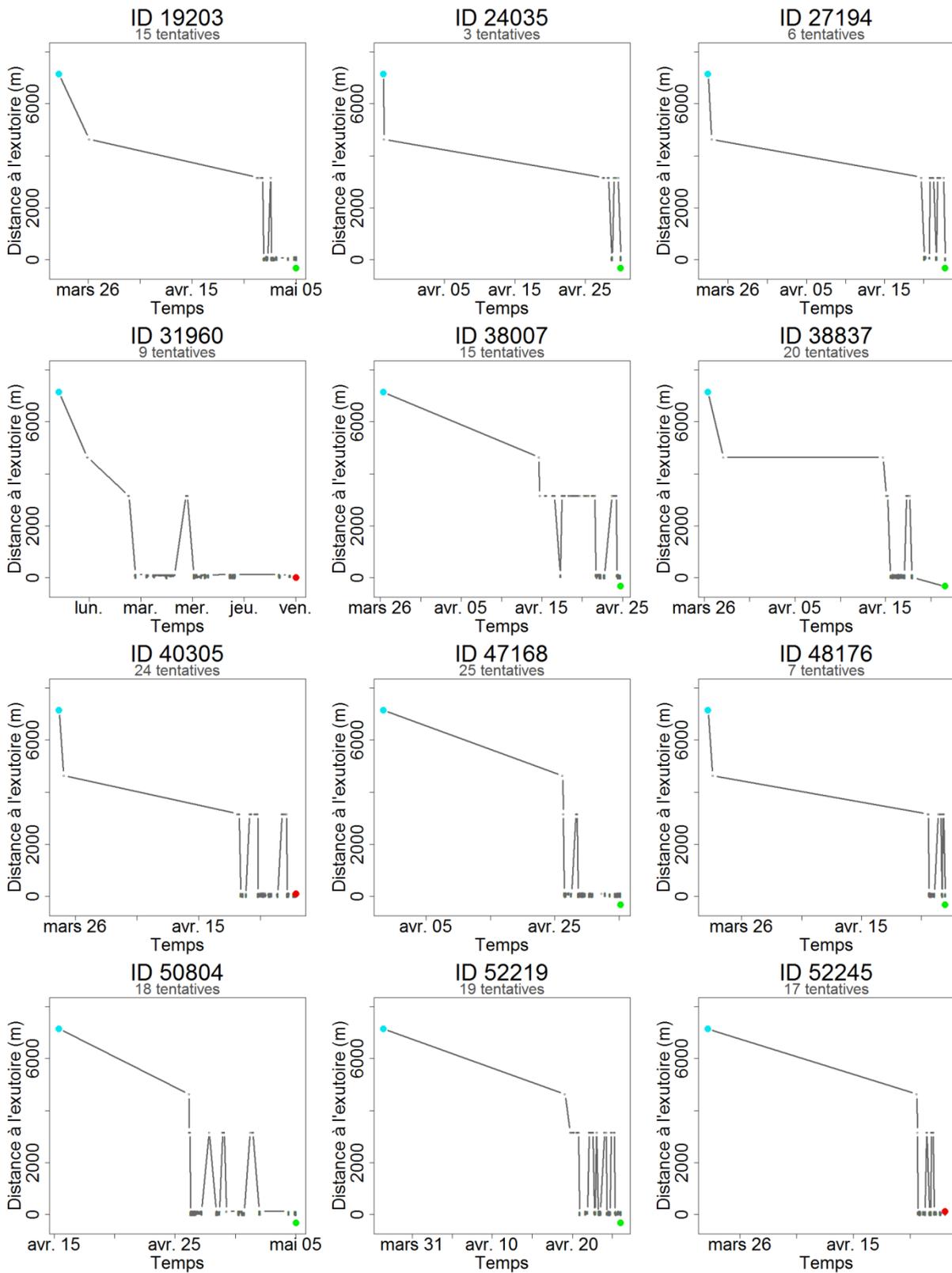


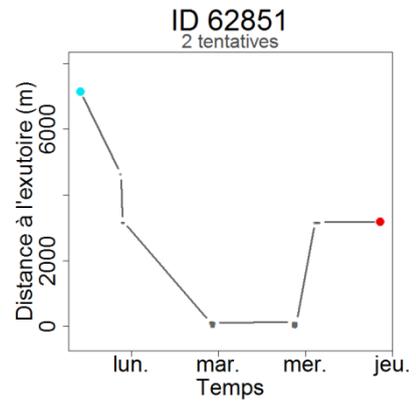
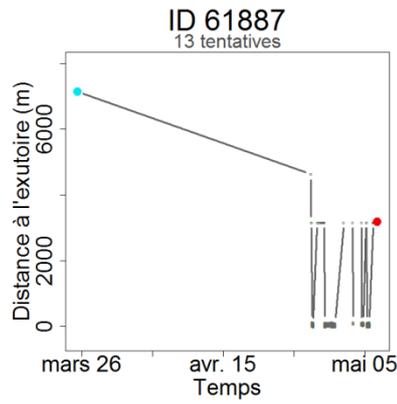
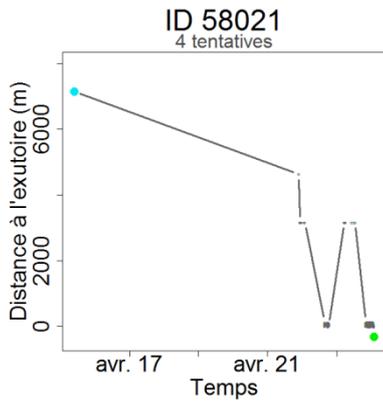




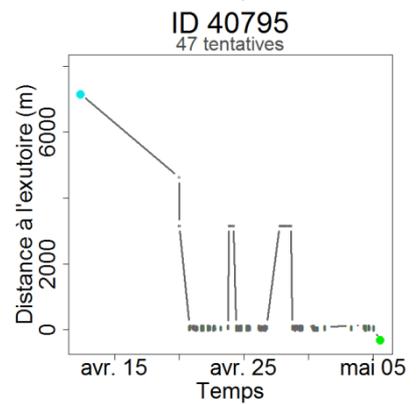
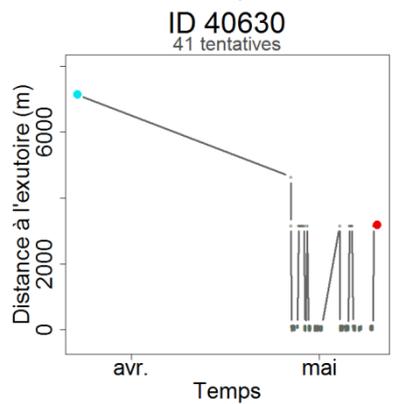
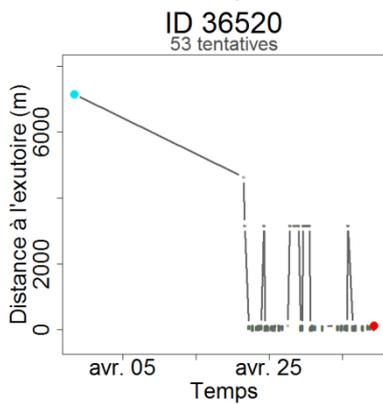
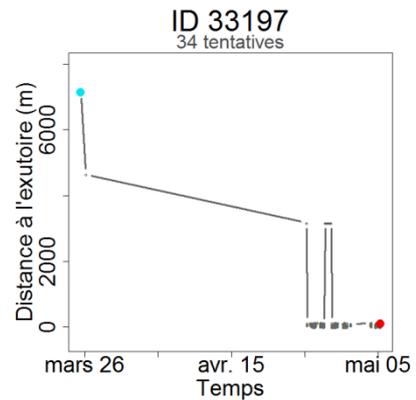
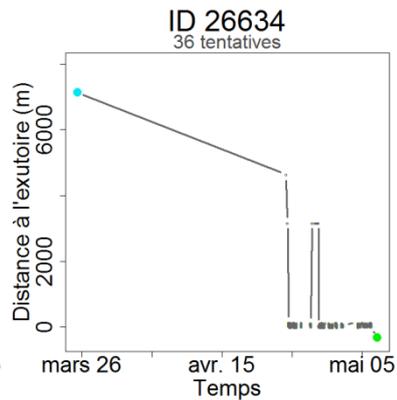
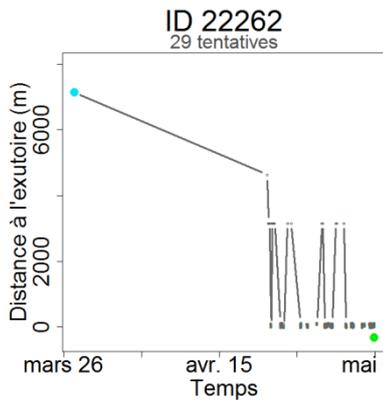
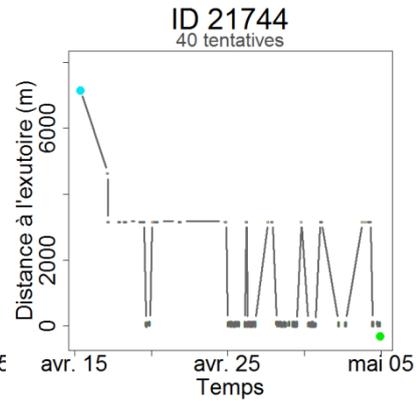
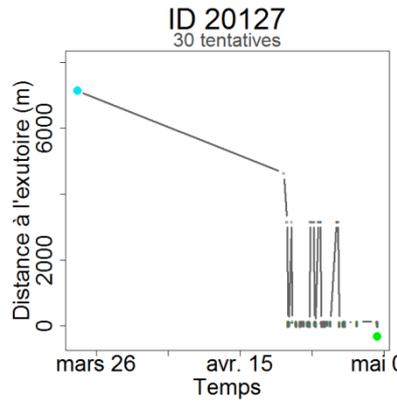
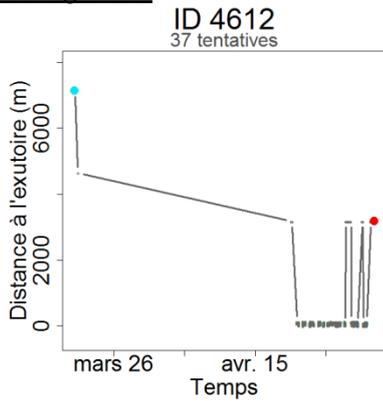
✓ Catégorie 2

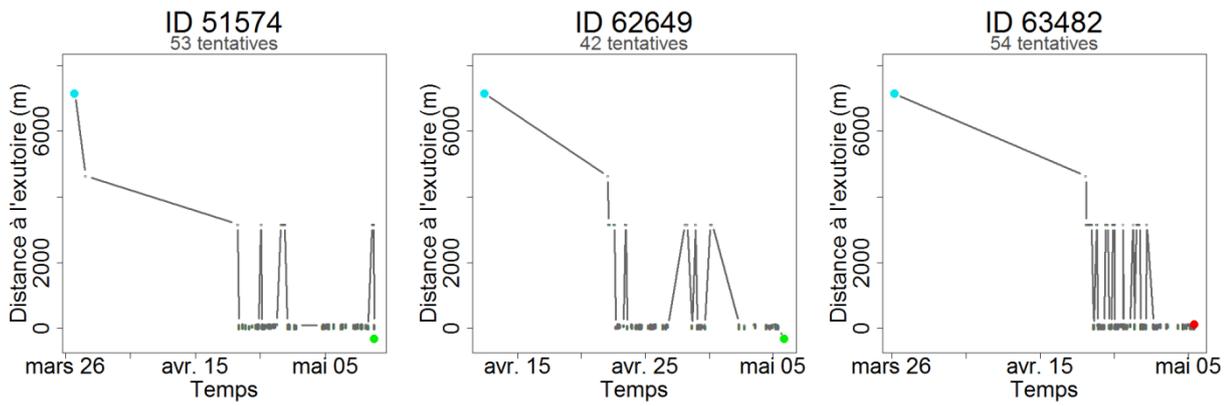




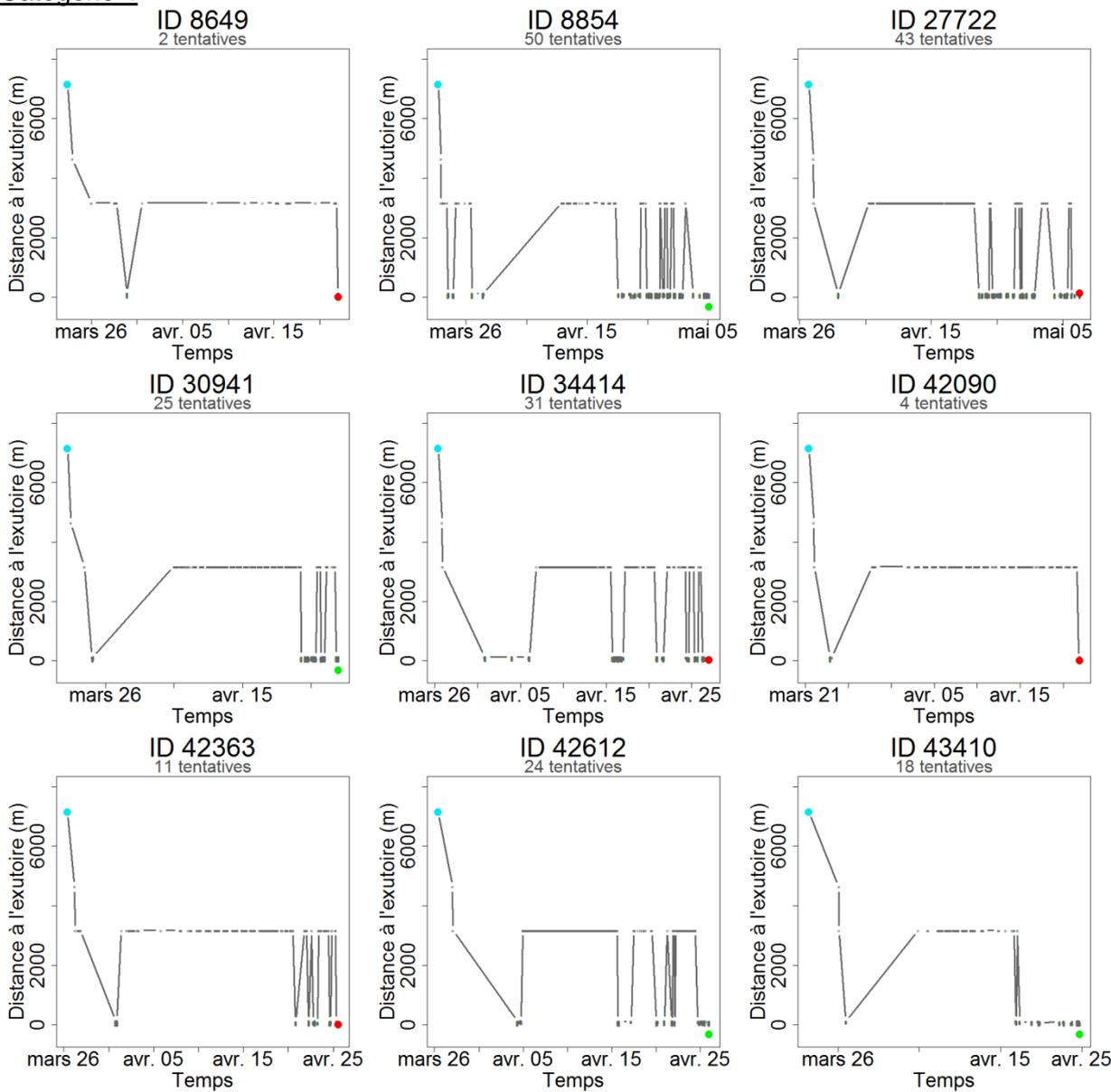


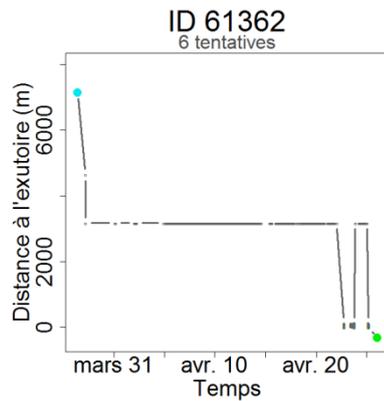
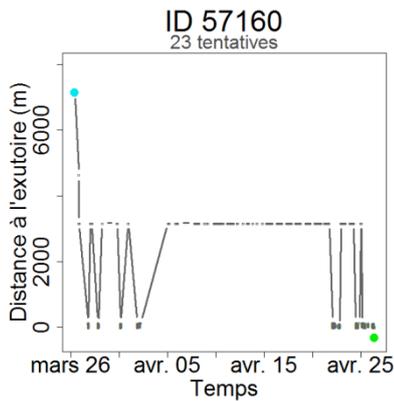
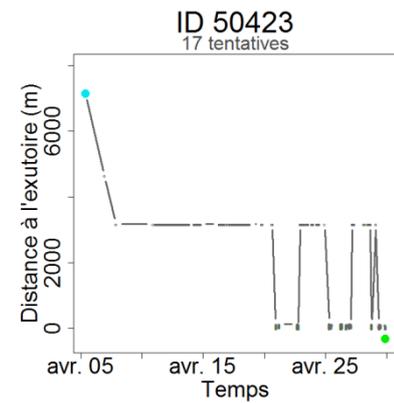
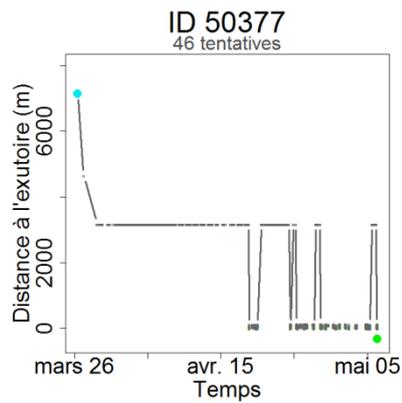
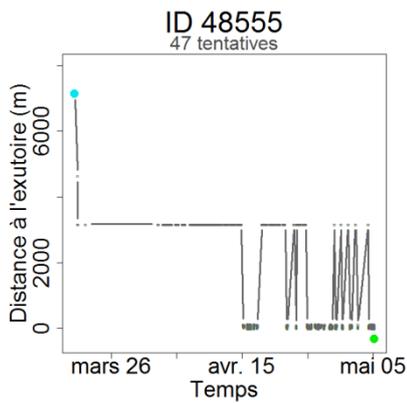
✓ **Catégorie 3**



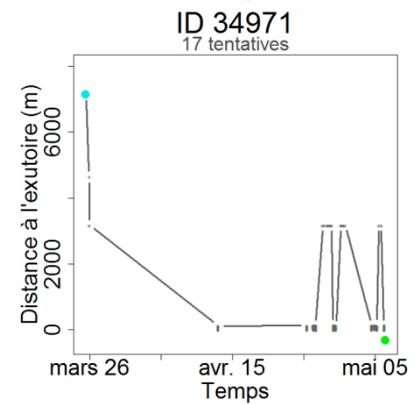
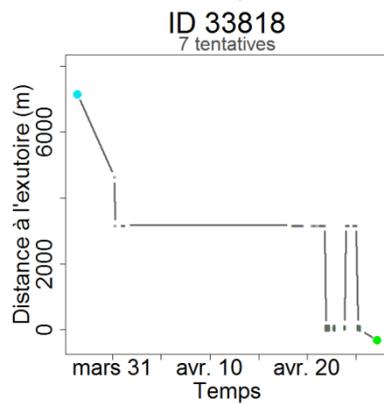
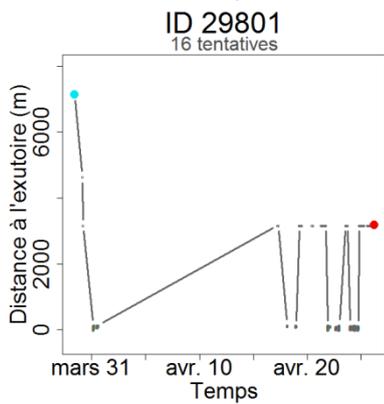
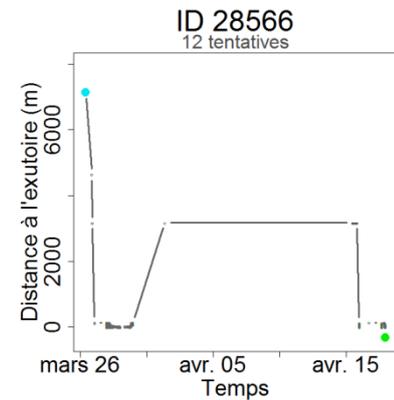
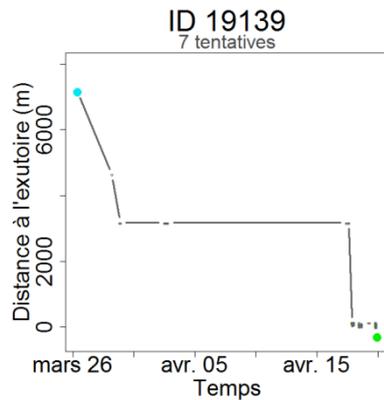
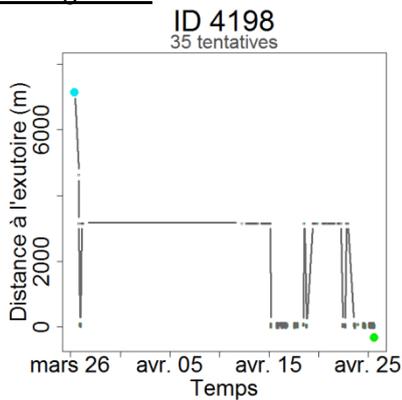


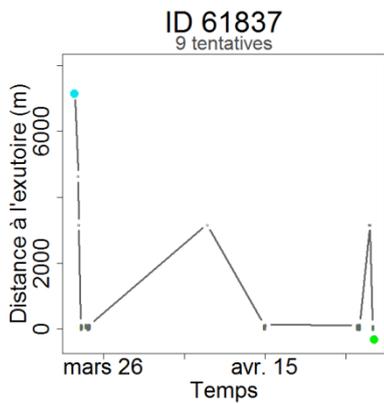
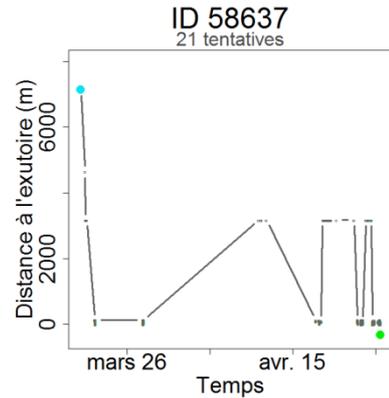
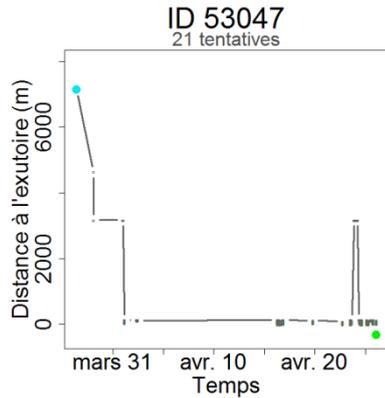
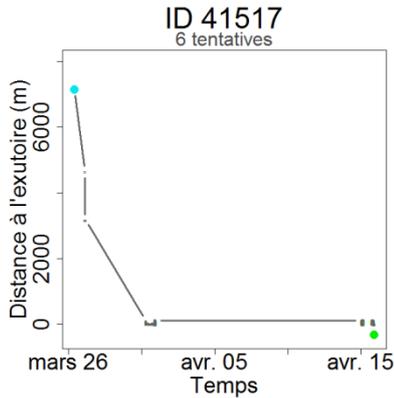
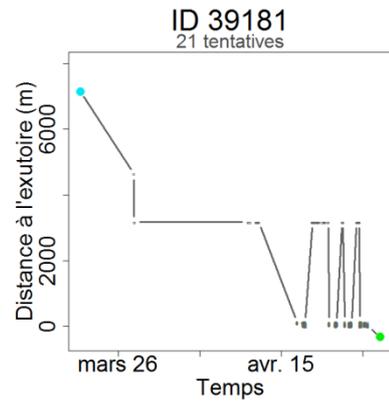
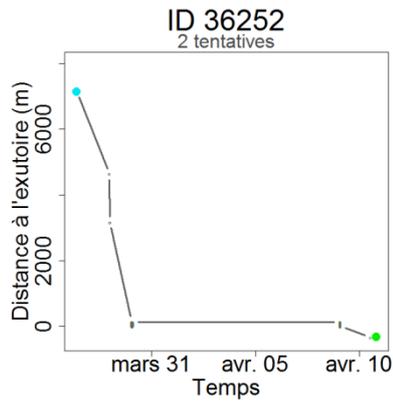
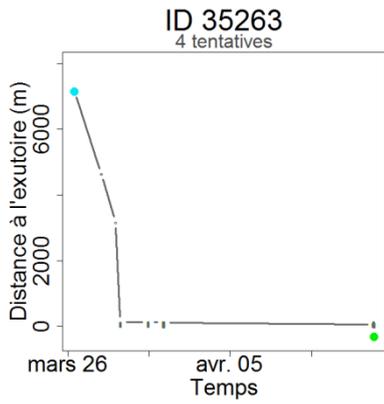
✓ Catégorie 4



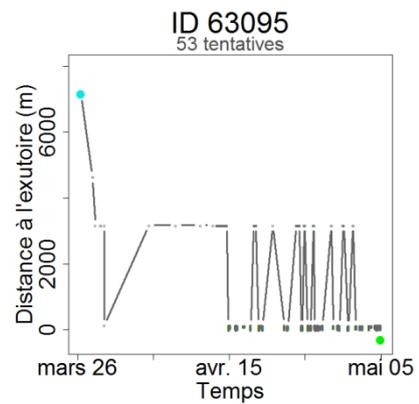
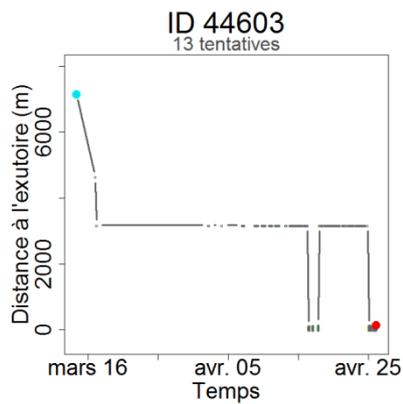
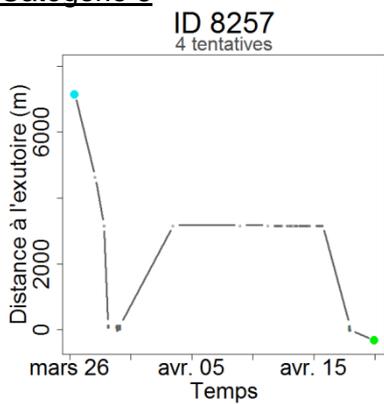


✓ Catégorie 5





✓ Catégorie 6



Annexe VIII : Erreur et taux de positionnement : une étape préliminaire nécessaire à l'analyse

En télémétrie acoustique 2D, deux calculs préliminaires sont nécessaires : le taux de positionnement (combien d'émissions sont détectées) et l'erreur de positionnement (avec quelle erreur une détection est positionnée).

Pour cela, trois trajectoires témoins ont été réalisées lorsque les hydrophones étaient dans l'eau. Les trajectoires témoins ont été réalisées en utilisant un émetteur de type Lotek JSAT qui émet toutes les 10 secondes (de la même catégorie que ceux utilisés cette année). Cet émetteur a été accroché à une perche, fixée verticalement sur un bateau de sorte que l'émetteur soit tout le temps immergé. En haut de la perche l'antenne du GPS différentiel mesurait les positions du bateau toutes les secondes (Figure 1a). Le bateau a réalisé trois trajectoires témoins dans la zone du barrage où les hydrophones détectent a priori les émetteurs afin de couvrir la totalité de la zone étudiée. Deux trajectoires témoins ont été réalisées dans le sens horaire (trajectoire verte) et une dans le sens horaire inverse (trajectoire bleue) comme indiqué sur la Figure 1b).



Figure 1 : Réalisation des trajectoires test :

(a) Montage de l'émetteur test ; (b) Description des trajectoires réalisées

Les trois trajectoires mesurées grâce au GPS sont ensuite projetées dans le logiciel QGIS.

Taux de positionnement

Les positions de l'émetteur test sont calculées avec le logiciel U-Map. L'émetteur émettant toutes les 10 secondes et la durée de chaque trajectoire témoin étant connue, le nombre d'émissions théoriques pour chaque trajectoire est calculé (Table 1). On appelle émissions positionnées les émissions pour lesquelles U-Map a calculé une position. Pour le taux de positionnement, toutes les positions calculées sont conservées (la précision du positionnement n'est pas considérée ici). Le taux de positionnement est obtenu en calculant le rapport des émissions positionnées par rapport aux émissions théoriques.

Table 1 : Nombre d'émissions théoriques et positionnées et taux de positionnement pour chaque trajectoire

	Trajectoire 1	Trajectoire 2	Trajectoire 3
Emissions théoriques	95	101	90
Emissions positionnées	49	47	40
Taux de positionnement	51.6%	46.5%	44.4%

En moyenne le taux de positionnement obtenu grâce à ces trajectoires test est de 47,6%. Dans la retenue, on positionne donc une émission sur deux.

Erreur de positionnement

Afin de caractériser le positionnement dans la zone du barrage, il a fallu garder les positions qui avaient une précision correcte toutes en conservant un nombre suffisant de données. Comme vu dans le III-B-1, on conserve les données ayant une $DOP \leq 0,3$.

Les différentes trajectoires enregistrées par le GPS et les trajectoires obtenues à partir des positions calculées par U-Map ont été tracées à l'aide du logiciel QGIS.



Figure 2 : Trajectoires test : Les trajectoires enregistrées par le GPS sont représentées respectivement en bleu ciel, violet et jaune et les trajectoires calculées par U-Map sont représentées en bleu foncé, rose et orange.

Les positions calculées suivent relativement bien les positions mesurées par le GPS.

Pour caractériser l'erreur de positionnement, il faut calculer la distance entre la position calculée et la position réelle de l'émetteur. Toutefois, comme les hydrophones présentent une dérive de temps qu'on ne sait pas ajuster et que les positions calculées semblent suivre les positions mesurées, l'erreur de positionnement correspondra à la distance entre la position calculée et la position mesurée la plus proche (Roy, 2014).

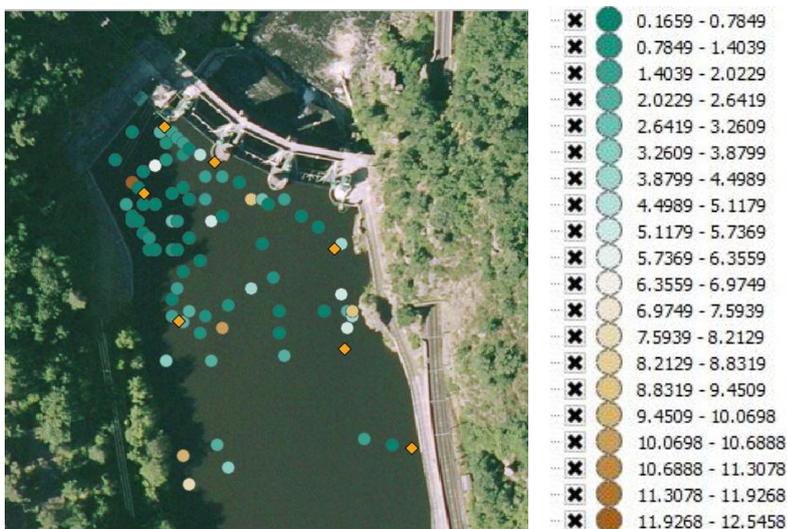


Figure 3 : Représentation dans QGIS de l'erreur de position calculée.

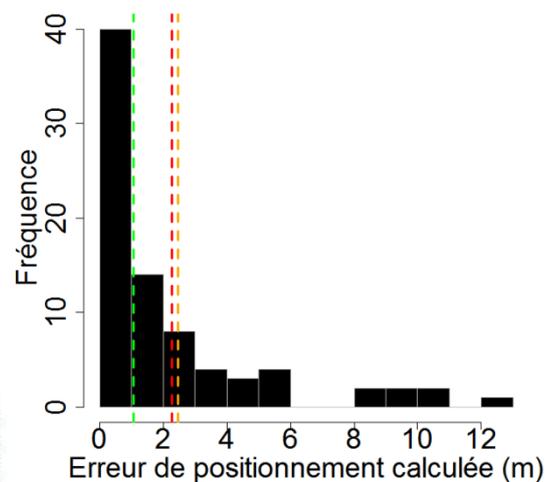


Figure 4 : Histogramme de la valeur de l'erreur de positionnement calculée.

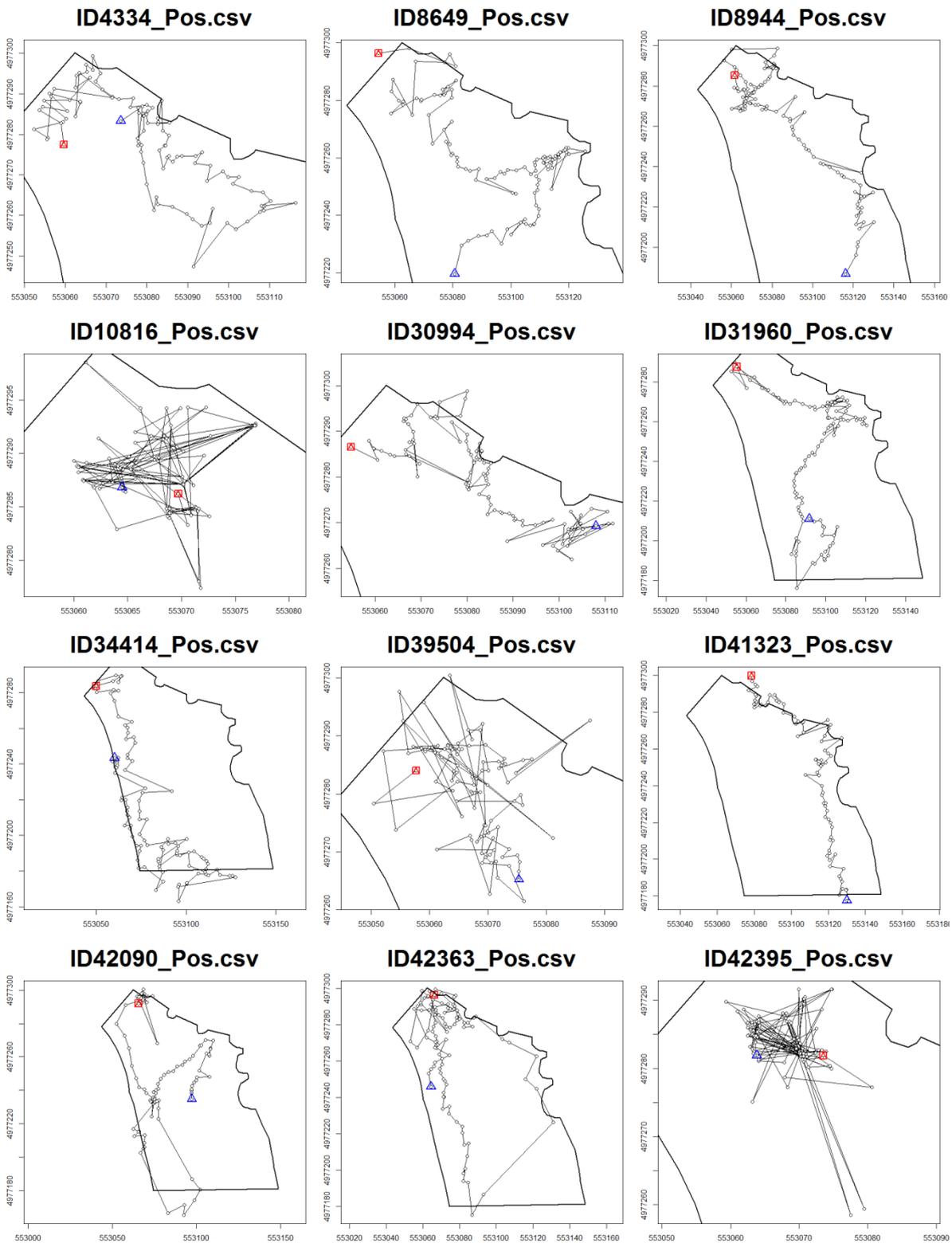
Les erreurs de positionnement calculées sont généralement faibles (médiane de 1,1 m). Les valeurs fortes sont de fréquences faibles (75% des données ont une valeur plus faible que 2,5 m

d'erreur). La valeur de l'erreur varie de 0,2 m à 12,6 m. Les positions avec de fortes erreurs ne semblent pas être géographiquement réparties. La carte montre que le positionnement est relativement bon dans toute la zone où il y a des positions. Le positionnement semble être un peu meilleur dans la zone en rive droite du barrage (vert le plus foncé).

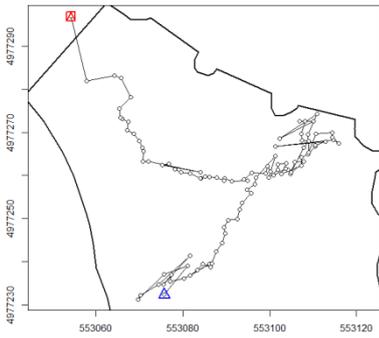
Remarque : Etant donné que les positions disponibles sont peu nombreuses et pas réparties de manière spatiale régulière, il n'a pas été possible de lisser la carte.

Annexe IX : Représentation des 100 dernières détections des smolts non détectés dans le TCC dont la dernière détection est dans la zone de la retenue avec le package adehabitatLT de R

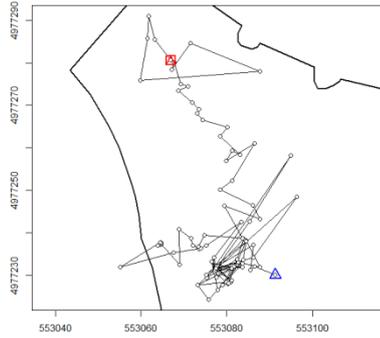
✓ Dernière détection dans la zone d'influence de la prise d'eau et de l'exutoire



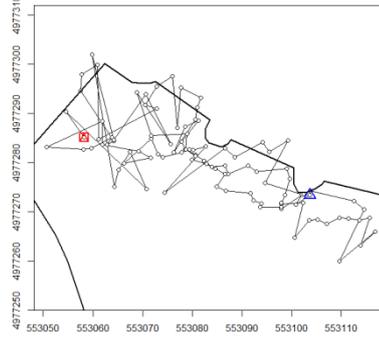
ID49744_Pos.csv



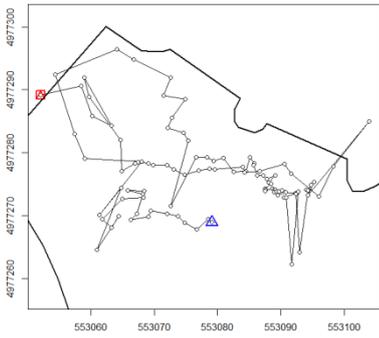
ID50031_Pos.csv



ID55735_Pos.csv

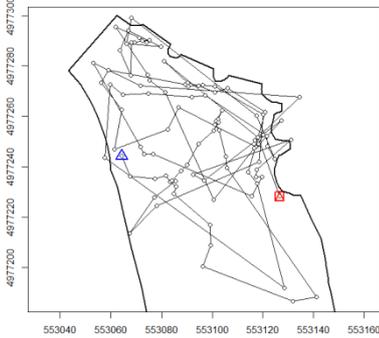


ID58592_Pos.csv

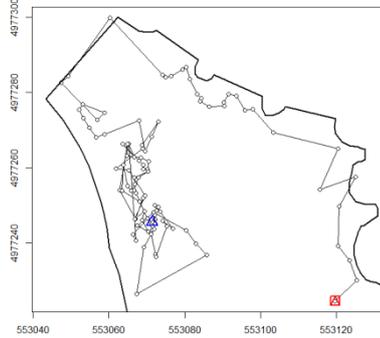


✓ Dernière détection au milieu de la zone du barrage

ID33197_Pos.csv

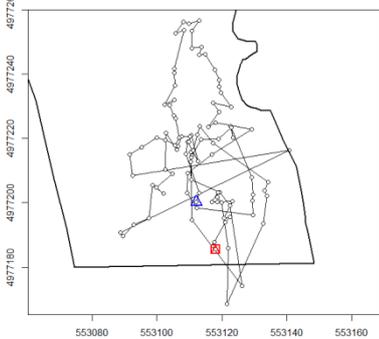


ID40305_Pos.csv

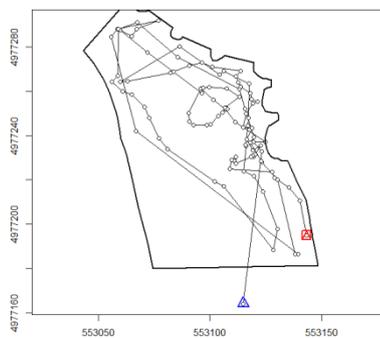


✓ Dernière détection en fin de la zone d'étude du barrage

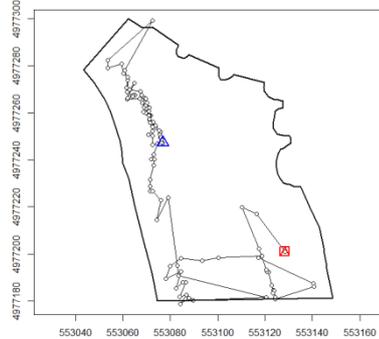
ID5379_Pos.csv



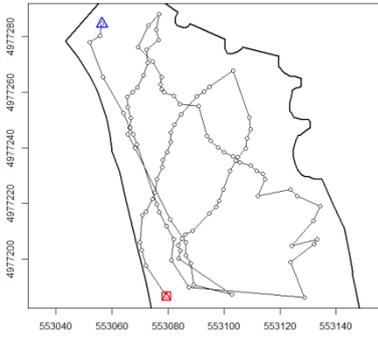
ID27722_Pos.csv



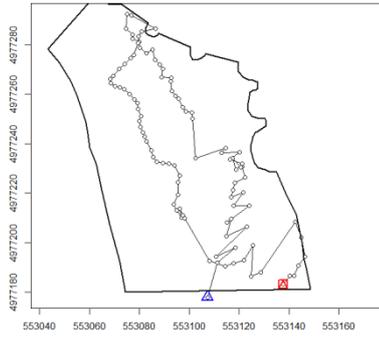
ID27874_Pos.csv



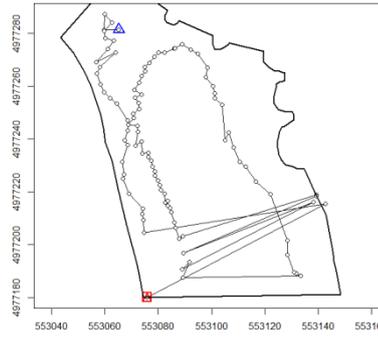
ID36520_Pos.csv



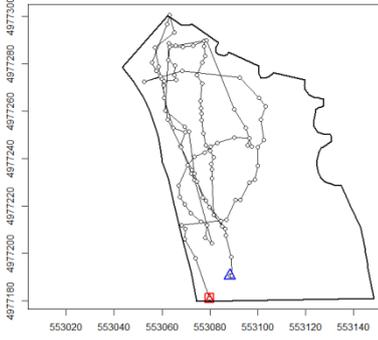
ID44603_Pos.csv



ID52245_Pos.csv



ID63482_Pos.csv



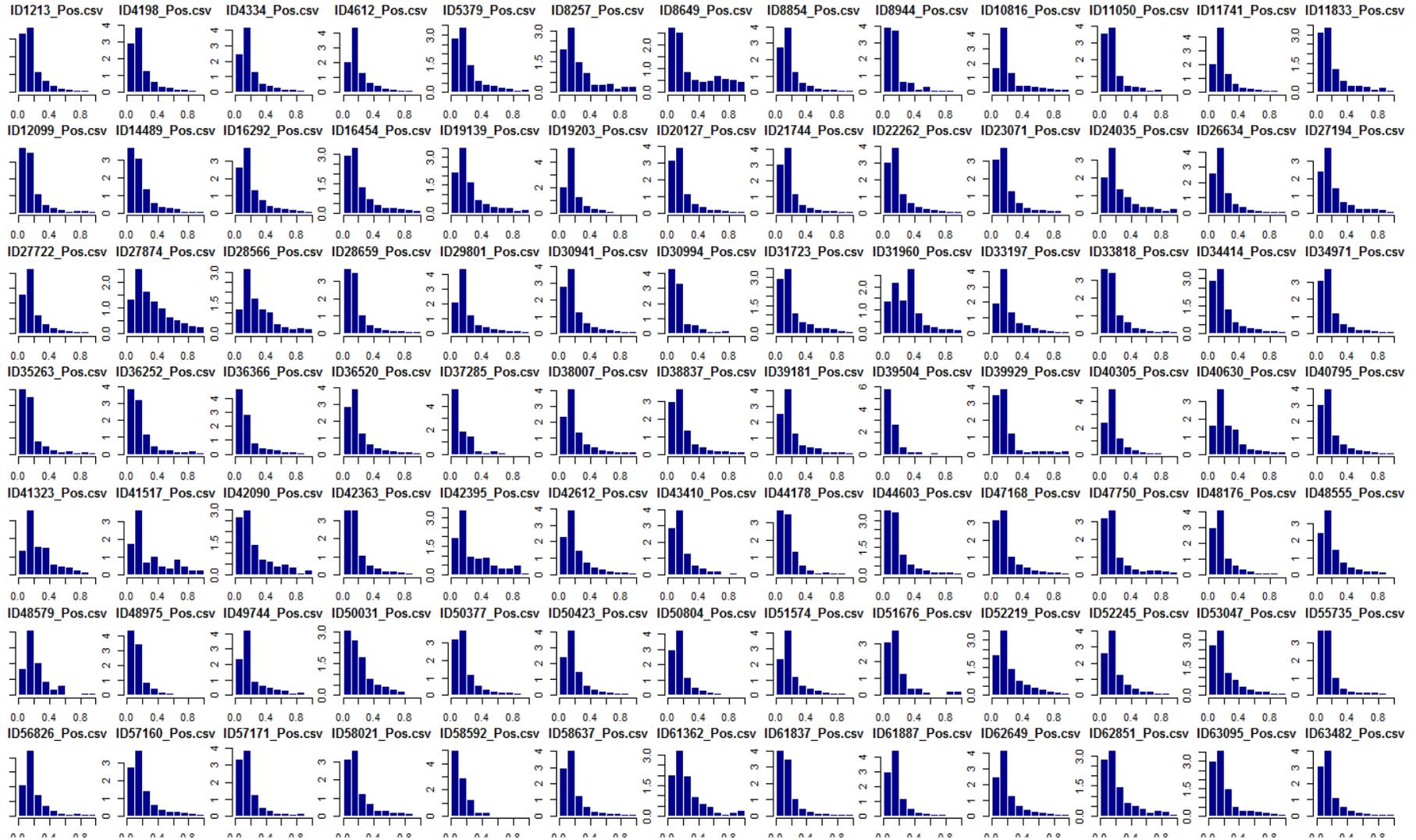
Annexe X : Nombre de données dans la zone du barrage pour chaque smolt avec toutes les DOP, les DOP $\leq 0,4$ et les DOP $\leq 0,3$ avec les pourcentages associés

ID	Nombre de données brutes	Nombre de données pour une DOP ≤ 0.4	Pourcentage de données conservées pour une DOP ≤ 0.4	Nombre de données pour une DOP ≤ 0.3	Pourcentage de données conservées pour une DOP ≤ 0.3	Différence de nombre de données entre une DOP ≤ 0.4 et une DOP ≤ 0.3	Pourcentage de la différence de données entre une DOP ≤ 0.4 et une DOP ≤ 0.3
1213	3763	3050	81,1	2811	74,7	239	6,4
4198	8546	6638	77,7	6145	71,9	493	5,8
4334	6331	4720	74,6	4399	69,5	321	5,1
4612	10551	7940	75,3	7279	69	661	6,3
5379	1930	1374	71,2	1269	65,8	105	5,4
8257	784	449	57,3	393	50,1	56	7,1
8649	1595	662	41,5	607	38,1	55	3,4
8854	18241	13641	74,8	12640	69,3	1001	5,5
8944	333	275	82,6	257	77,2	18	5,4
10816	10525	5541	52,6	5189	49,3	352	3,3
11050	387	301	77,8	287	74,2	14	3,6
11741	10507	8321	79,2	7728	73,6	593	5,6
11833	885	611	69	564	63,7	47	5,3
12099	2347	1934	82,4	1825	77,8	109	4,6
14489	927	749	80,8	700	75,5	49	5,3
16292	4392	3276	74,6	2984	67,9	292	6,6
16454	4181	2803	67	2555	61,1	248	5,9
19139	846	587	69,4	534	63,1	53	6,3
19203	7542	6170	81,8	5784	76,7	386	5,1
20127	9370	7515	80,2	7028	75	487	5,2
21744	16106	12928	80,3	12131	75,3	797	4,9
22262	10071	7624	75,7	7076	70,3	548	5,4
23071	1128	924	81,9	861	76,3	63	5,6
24035	371	256	69	226	60,9	30	8,1
26634	14685	11595	79	10796	73,5	799	5,4
27194	902	623	69,1	573	63,5	50	5,5
27722	11263	8974	79,7	8332	74	642	5,7
27874	18612	9726	52,3	7902	42,5	1824	9,8
28566	13526	8151	60,3	6811	50,4	1340	9,9
28659	3017	2379	78,9	2248	74,5	131	4,3
29801	6651	4970	74,7	4599	69,1	371	5,6
30941	8773	6742	76,8	6235	71,1	507	5,8
30994	403	316	78,4	295	73,2	21	5,2
31723	5692	3986	70	3668	64,4	318	5,6
31960	7906	5012	63,4	3222	40,8	1790	22,6
33197	6688	4595	68,7	4194	62,7	401	6
33818	2852	2194	76,9	2034	71,3	160	5,6

34414	10665	7952	74,6	7324	68,7	628	5,9
34971	6407	4898	76,4	4568	71,3	330	5,2
35263	1768	1424	80,5	1337	75,6	87	4,9
36252	980	757	77,2	712	72,7	45	4,6
36366	629	491	78,1	464	73,8	27	4,3
36520	13661	10267	75,2	9544	69,9	723	5,3
37285	7621	6622	86,9	6409	84,1	213	2,8
38007	2653	1919	72,3	1771	66,8	148	5,6
38837	3675	2756	75	2572	70	184	5
39181	3277	2454	74,9	2278	69,5	176	5,4
39504	457	404	88,4	395	86,4	9	2
39929	412	349	84,7	338	82	11	2,7
40305	10697	9024	84,4	8476	79,2	548	5,1
40630	13685	9714	71	8072	59	1642	12
40795	16260	12567	77,3	11693	71,9	874	5,4
41323	158	96	60,8	78	49,4	18	11,4
41517	5961	3722	62,4	3189	53,5	533	8,9
42090	692	442	63,9	401	57,9	41	5,9
42363	3808	3096	81,3	2911	76,4	185	4,9
42395	1047	399	38,1	351	33,5	48	4,6
42612	5782	4291	74,2	3910	67,6	381	6,6
43410	2880	2323	80,7	2169	75,3	154	5,3
44178	1576	1352	85,8	1269	80,5	83	5,3
44603	3691	2964	80,3	2770	75	194	5,3
47168	11898	8867	74,5	8254	69,4	613	5,2
47750	3327	2174	65,3	2033	61,1	141	4,2
48176	3399	2807	82,6	2614	76,9	193	5,7
48555	10790	7897	73,2	7208	66,8	689	6,4
48579	85	68	80	61	71,8	7	8,2
48975	9293	8248	88,8	7834	84,3	414	4,5
49744	361	241	66,8	221	61,2	20	5,5
50031	2167	1609	74,3	1451	67	158	7,3
50377	13863	10614	76,6	9904	71,4	710	5,1
50423	4232	3257	77	3016	71,3	241	5,7
50804	10835	8694	80,2	8157	75,3	537	5
51574	17272	12637	73,2	11646	67,4	991	5,7
51676	335	256	76,4	243	72,5	13	3,9
52219	4142	2838	68,5	2555	61,7	283	6,8
52245	4428	3411	77	3144	71	267	6
53047	9601	6968	72,6	6255	65,1	713	7,4
55735	2100	1670	79,5	1592	75,8	78	3,7
56826	2022	1584	78,3	1457	72,1	127	6,3
57160	5965	4207	70,5	3881	65,1	326	5,5
57171	2344	1935	82,6	1826	77,9	109	4,7
58021	2405	1907	79,3	1753	72,9	154	6,4

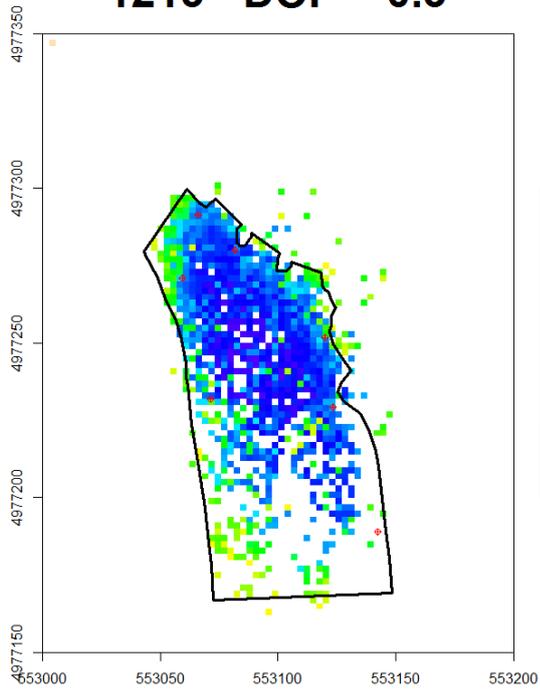
58592	433	388	89,6	375	86,6	13	3
58637	4417	3607	81,7	3372	76,3	235	5,3
61362	684	464	67,8	410	59,9	54	7,9
61837	7867	6133	78	5820	74	313	4
61887	11891	10312	86,7	9720	81,7	592	5
62649	9032	6957	77	6428	71,2	529	5,9
62851	830	549	66,1	504	60,7	45	5,4
63095	16633	12366	74,3	11585	69,7	781	4,7
63482	21531	17467	81,1	16309	75,7	1158	5,4
Total	545253	407967	74,8	374810	68,7	33157	6,1

Annexe XI : Histogrammes des DOP ≤ 1 par smolt

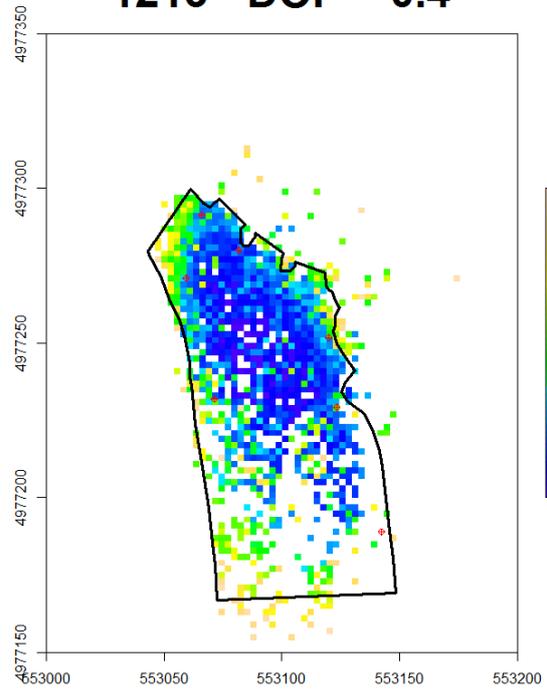


Annexe XII : Cartes des positions de deux smolts pour les DOP $\leq 0,3$ et les DOP $\leq 0,4$

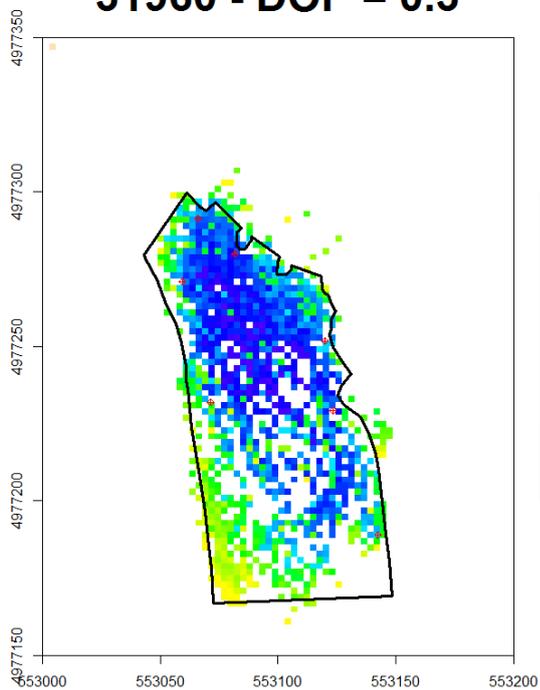
1213 - DOP = 0.3



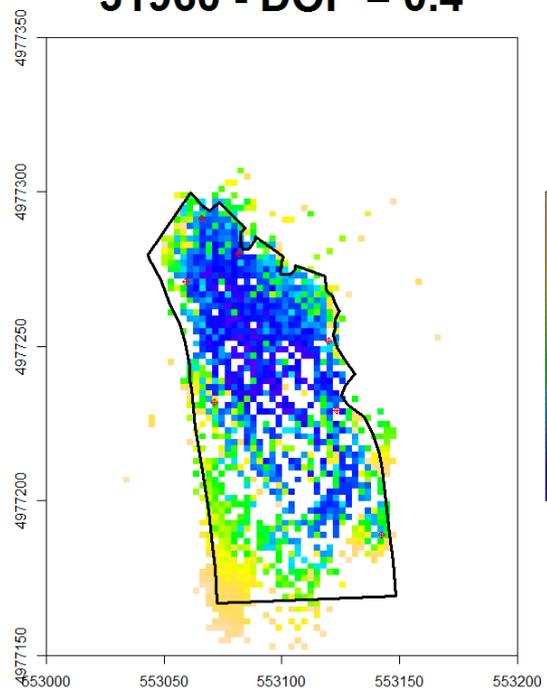
1213 - DOP = 0.4



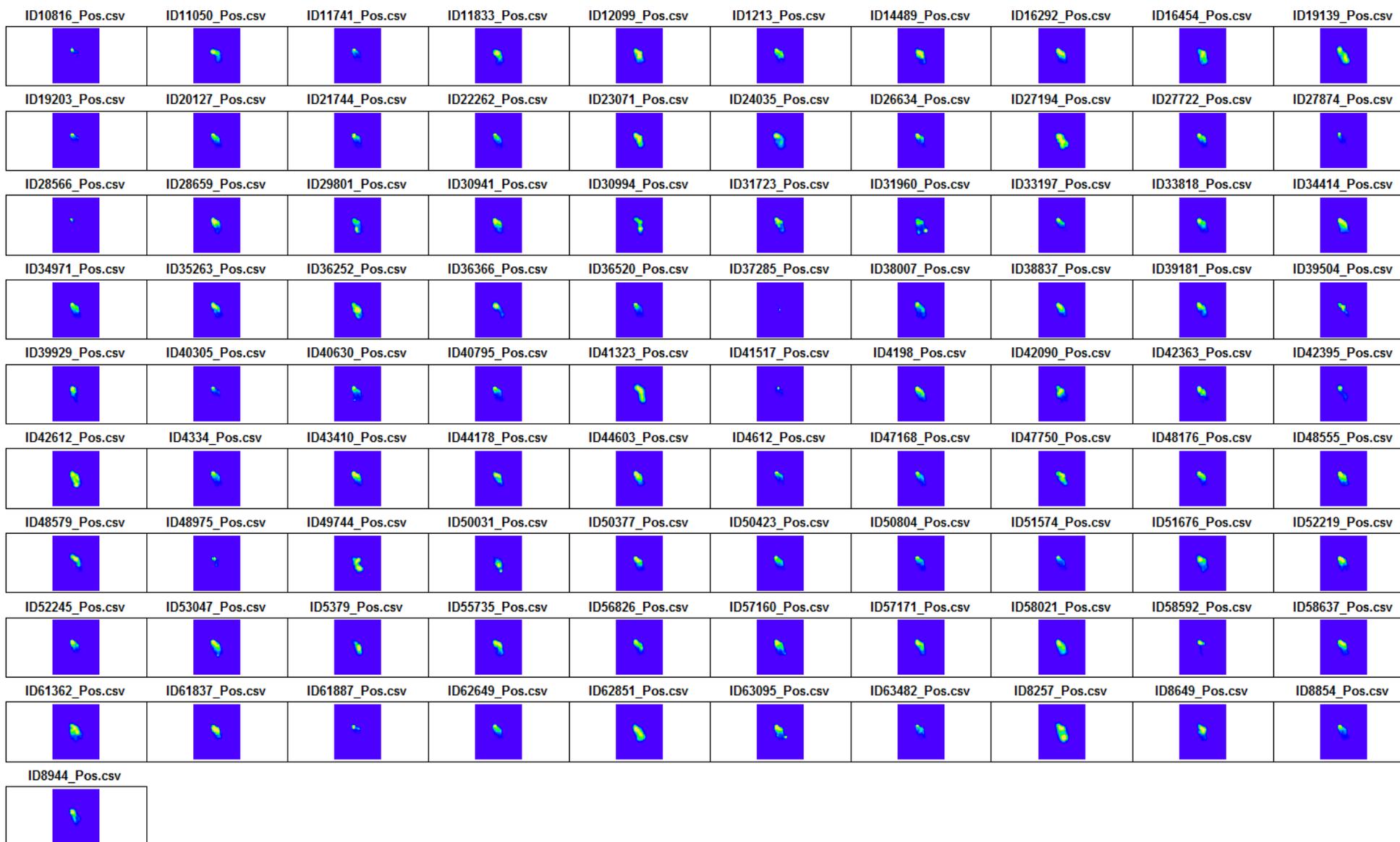
31960 - DOP = 0.3



31960 - DOP = 0.4



Annexe XIII: Sortie de la fonction kernel du package adehabitatHR de R par smolt, paramètre de lissage de référence



Annexe XIV : Première exploitation du package BCPA de R en utilisant la vitesse persistante

Les positions et trajectoires peuvent être tracées à l'aide de ce package. Le smolt 49744 présente 221 positions.

ID 49744 (221 positions)

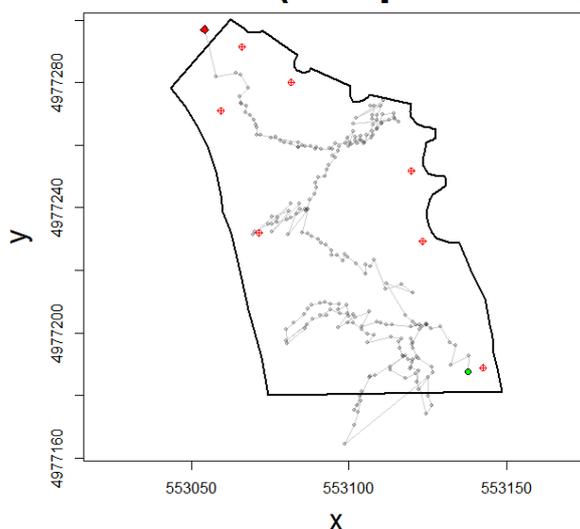


Figure 1 : Représentation des positions du poisson 49744

Ce package permet de réaliser une analyse de la trajectoire tout en choisissant quelle type de vitesse étudier, quelle taille de fenêtre d'observation utiliser et quel est le pas de position que la fenêtre doit suivre.

Les deux vitesses qui peuvent être suivies sont la vitesse persistante :

$$Vp = V * \cos \theta$$

qui représente la tendance d'un mouvement à persister dans la même direction, ou la vitesse tournante :

$$Vt = V * \sin \theta$$

qui représente la tendance d'un mouvement à aller dans une direction perpendiculaire, avec V la vitesse sur la fenêtre et θ l'angle de virage.

Dans cet exemple, seule la vitesse persistante est étudiée, avec une fenêtre d'observation de 50 positions et un pas d'une position. L'analyse donne accès aux « change points » que l'utilisateur choisi de garder en fonction du modèle désiré.

```
> CPsummary[[1]]
  x1   middle size modelmode middle.POSIX
1   1 1427168493   5       2 1427168498
2   4 1427168537   1       6 1427168544
3  29 1427169106   6       2 1427169114
4  30 1427169122  11       2 1427169127
5  65 1427169794   1       2 1427169799
6  69 1427169856   1       6 1427169860
7  70 1427169879   3       6 1427169882
8  72 1427169931  15       2 1427169933
9  73 1427169962   3       3 1427169965
10 75 1427169998   1       2 1427170000
11 81 1427170165   7       2 1427170169
12 89 1427170364   3       4 1427170366
13 94 1427170482   1       2 1427170485
```

Figure 2 : Sortie de R correspondant aux « change points » trouvés suite à l'analyse de la trajectoire

La première colonne donne la position du point considéré comme un « change point » dans la table de données du poisson 49744. De cette manière, il est possible de récupérer les positions considérées comme des « change points » et de les représenter sur une carte pour étudier leur répartition en fonction des différents critères évoqués dans la discussion.

	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Halieutique Spécialisation / option : Ressources et Ecosystèmes Aquatiques Enseignant référent : Dominique OMBREDANE ; Elodie REVEILLAC
Auteur(s) : Marine LEMAIRE Date de naissance* : 05/04/1991	Organisme d'accueil : EDF R&D, Laboratoire National d'Hydraulique & Environnement Adresse : 6 quai Wattier, 78 401 Chatou
Nb pages : 68 Annexe(s) :14 (29 pages)	Maître de stage : Stéphane TETARD
Année de soutenance : 2015	
Titre français : Etude du comportement de dévalaison des smolts de saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) au droit de la retenue de Poutès (Allier, France) à l'aide de la télémétrie acoustique 2D.	
Titre anglais : Study of the downstream migration behavior of Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i>) smolts near Poutes dam (Allier, France) using 2D acoustic telemetry	
Résumé (1600 caractères maximum) : Sur le système Loire-Allier, les smolts de saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) doivent parcourir plus de 900 km pour rejoindre l'océan depuis leurs habitats de croissance. Tout au long de leur dévalaison, ils rencontrent des ruptures de connectivité telles que des barrages ou des seuils. Situé à 860 km de l'estuaire, le barrage de Poutès, bien qu'équipé de dispositifs permettant la dévalaison et la montaison, induit un retard dans la migration des smolts. En 2013 et 2014, une étude de la dévalaison par tambour rotatif en amont de la retenue de Poutès a montré que des pics migratoires se produisent en mars alors que les passages importants dans l'exutoire sont enregistrés à la mi-avril. Cette étude porte sur la migration des smolts depuis l'amont de la retenue de Poutès jusqu'à leur arrivée dans le tronçon court-circuité et notamment sur leur comportement dans la retenue et à l'approche de l'ouvrage. Cent juvéniles sauvages ont été suivis par télémétrie acoustique (technologie JSAT) permettant un positionnement en 2D. Les données révèlent que le barrage induit effectivement un retard (temps de transit médian de 9,3 jours) qui s'explique par une réticence à emprunter l'exutoire de dévalaison et par une désorientation dans la retenue (nombreuses tentatives dans la zone du barrage allant jusqu'à des allers-retours jusqu'en queue de retenue). Les données obtenues soulignent aussi un effet de la saisonnalité dans le comportement des smolts. Autour de la mi-avril s'effectue un changement de comportement chez les juvéniles : ils semblent d'abord migrer passivement puis devenir actifs.	
Abstract (1600 caractères maximum): On the Loire-Allier system, the Atlantic salmon smolts (<i>Salmo salar</i>) have to travel through more than 900 km from their growth habitat to enter the ocean. All along their downstream migration, they encounter disruptions of connectivity such as dams and weirs. Poutes dam is on the Allier River at 860 km upstream the estuary. Even if it is equipped with upstream and downstream migration devices, delays in downstream migration remain. In 2013 and 2014, a study about the downstream migration using rotative screw trap upstream Poutes headpond showed that peaks of smolts occur in March whereas the smolts have not been recorded in the bypass until mid-April. Downstream migration is studied here, from upstream Poutes headpond until smolts arrival in the bypass stretch. To be more specific their behavior in the headpond and near the dam is studied. A hundred wild smolts have been followed using acoustic telemetry (with JSAT technology) which allows a 2D positioning. Data show that the dam induces to a delay (transit in the headpond lasts 9.3 days) which can be explained by an hesitation to use the bypass and by a desorientation in the headpond (several attempts to pass through dam and back and forth until the end of the headpond). Data also highlight a seasonal effect in smolts behavior. Around mid-April a change in juvenile behavior is observed: they seem to first move downstream passively and then become active.	
Mots-clés : smolt, saumon atlantique, dévalaison, barrage de Poutès, télémétrie acoustique 2D	
Key Words: smolt, Atlantic salmon, downstream migration, Poutes dam, 2D acoustic telemetry	

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires