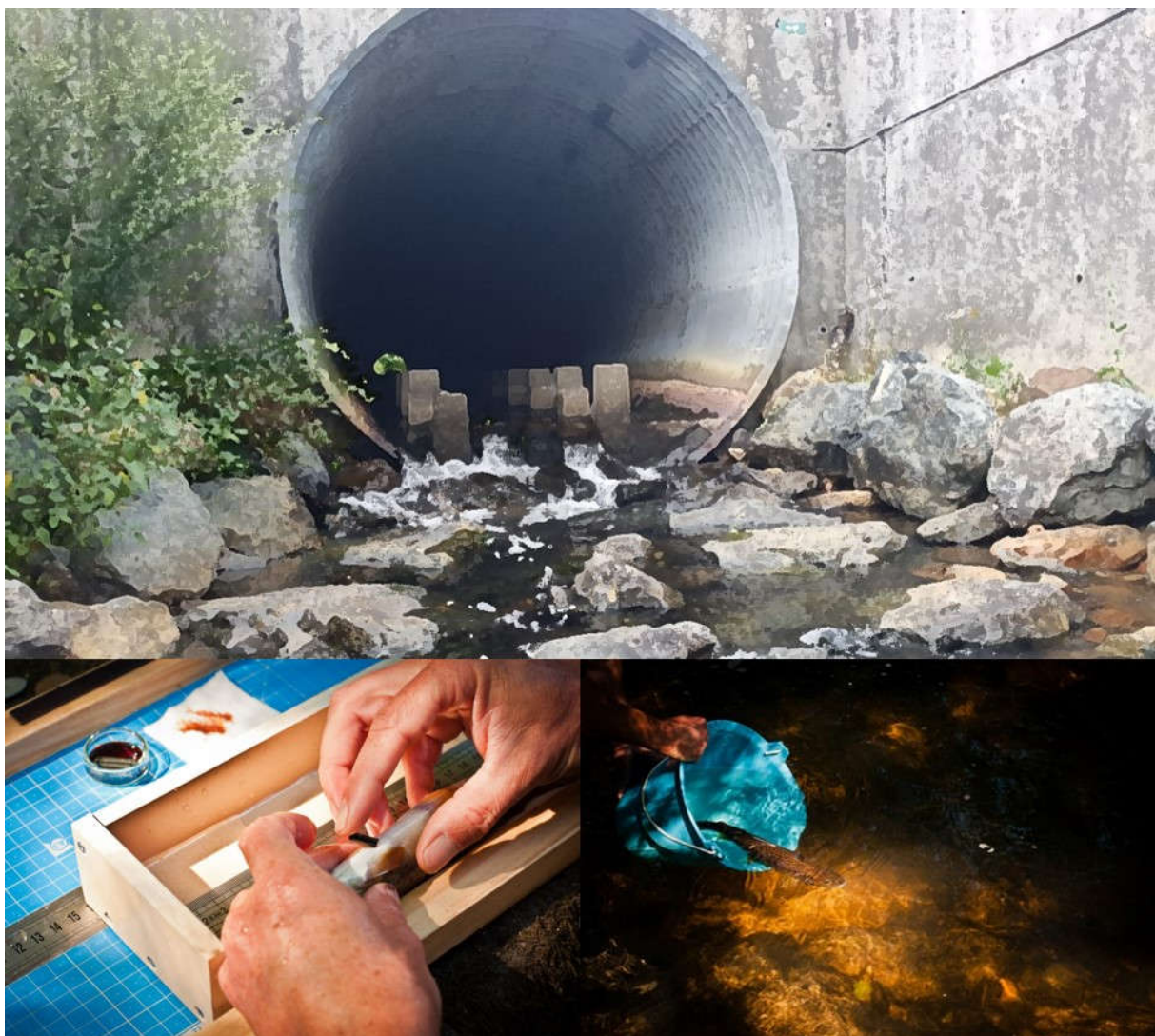


**ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE DE LA BUSE OH448
de l'A89 SUR LA DUROLLE (63)**

Utilisation de la technologie RFID

RAPPORT FINAL



SOMMAIRE

1.	Contexte et objectifs de l'étude	7
2.	Matériel et méthodes	8
2.1	Design général de l'étude	8
2.2	Présentation du site d'étude et des particularités du linéaire étudié	8
2.2.1	Présentation de la Durolle et du site d'étude	8
2.2.2	Discrétisation spatiale et schématisation du linéaire d'étude.....	9
2.2.3	Présentation de la buse et des aménagements réalisés.....	10
2.3	Principe de la technologie RFID utilisée	12
2.4	Opérations de marquage de poissons.....	13
2.4.1	Capture et marquage des poissons.....	13
2.4.2	Caractérisation de la population de truites marquées	15
2.4.3	Stratégie de relâcher des poissons.....	17
2.5	Dispositif fixe de suivi installé en amont de la buse.....	19
2.5.1	Présentation du dispositif	19
2.5.2	Caractérisation de la probabilité de détection	22
2.6	Campagnes de prospections mobiles.....	22
2.6.1	Présentation des campagnes	22
2.6.2	Estimation du taux de détections cumulées	25
2.7	Estimation du statut des transpondeurs détectés	26
3.	Conditions du suivi / efficacité du dispositif.....	28
3.1	Chroniques de débit et de température	28
3.2	Fonctionnement du dispositif fixe.....	30
3.2.1	Fonctionnement au cours du temps	30
3.2.2	Efficacité des antennes fixes	30
4.	Résultats du franchissement de la buse par les poissons.....	32
4.1	Synthèse des principaux résultats à retenir	32
4.2	Évolution des détections au cours du temps	32
4.3	Caractérisation des truites ayant franchi la buse.....	35
4.3.1	Influence de la translocation sur le franchissement	36
4.3.2	Influence de la distance à la buse	38
4.3.3	Influence des facteurs abiotiques	39
5.	Résultats issus des prospections mobiles.....	42
5.1	Estimation du taux de détection lors des suivis mobiles	42

5.2	Analyses de la mobilité des poissons marqués en aval de la buse	44
6.	Conclusion et enseignements	48
7.	Références	50

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation de la Durolle dans le département du Puy-de-Dôme (63, en haut) et du linéaire d'étude au regard du réseau routier/autoroutier local (en bas). En bleu : le secteur d'étude principal, en vert le secteur étendu vers l'aval et l'amont..... 9

Figure 2 : Localisation des tronçons d'étude le long du linéaire de la Durolle (carte en haut) et schématisation de ce linéaire par un découpage des tronçons (tableau en bas). 10

Figure 3 : Illustration du principe de la technologie HDX. 13

Figure 4 : Structures en tailles de la population de truites marquées (Lt en mm) en fonction de l'année (en haut) ou de l'origine des individus (en bas). 16

Figure 5 : Répartition des effectifs totaux de truites relâchées au cours des deux campagnes de marquage. En orange, les quantités transférées depuis l'amont de la buse..... 18

Figure 6 : Illustration des portées de détection estimées en fonction de la taille des transpondeurs utilisés..... 23

Figure 7 : Illustration des efforts de suivis mobiles au sein des différents tronçons d'étude. Pour rappel, le secteur d'étude initial est délimité par les balises bleues. 23

Figure 8 : Arbre de décision d'attribution d'un statut à un transpondeur détecté..... 26

Figure 9 : Chroniques de débit et de température au regard des dates de marquages des poissons et de suivis mobiles. Les données présentées sont horaires pour les débits et des moyennes horaires pour les températures..... 28

Figure 10 : Taux de détection des marker tag estimé pour les deux antennes du système fixe. La durée du suivi est de 730 jours. Le débit moyen journalier est aussi représenté. 30

Figure 11 : Effectif de nouveaux poissons détectés par jour (histogramme bleu) et proportion cumulée associée (courbe noire). Les flèches rouges indiquent les dates de marquage. Les lignes grises indiquent les périodes de dysfonctionnement du système fixe. 34

Figure 12 : Nombre de nouveaux poissons détectés chaque jour exprimé en fonction de leur année de marquage (2017 et 2018). La chronique commence la veille de la seconde campagne de marquage, soit le 06/07/2018. Les flèches rouges indiquent les dates de marquage..... 34

Figure 13 : Distribution des tailles des truites (Lt en mm) ayant franchi la buse et comparaison avec la distribution des poissons provenant de l'amont de la buse et la totalité des poissons marqués..... 35

Figure 14 : Nombre de nouveaux poissons marqués détectés chaque jour par les antennes fixes, en fonction de leur origine (amont en rouge ou aval en bleu). En haut, les poissons détectés à la suite de la première campagne de marquage en août 2017. En bas, les nouveaux poissons détectés à la suite de la seconde campagne de marquage en juillet 2018. Les proportions cumulées de nouveaux poissons ayant franchi la buse chaque jour sont représentées : elles sont présentées en fonction de l'origine des truites ; la totalité de la chronique n'étant pas représentée, la proportion cumulée présentée n'atteint pas 100% (notamment pour les truites d'origine aval). Les flèches rouges indiquent les dates de marquage. 37

Figure 15 : Proportion de poissons marqués et relâchés en aval de la buse, ayant franchi la buse (histogrammes bleus avec intervalle de confiance de 5%), en fonction du tronçon d'origine. Les nombres indiqués sur les histogrammes indiquent les effectifs de poissons

relâchés par tronçon (uniquement d'origine aval). Les distances à la buse (en m) de chaque point d'intérêt sont rappelées (obstacles et milieu des tronçons)..... 38

Figure 16 : Proportions de poissons ayant franchis la buse en fonction des plages de débits utilisées pour caler le dimensionnement hydraulique du dispositif de franchissement. Effectif total=91. 39

Figure 17 : Relation entre le débit moyen journalier (en m³/s) calculé au moment du franchissement de la buse par les poissons issus de l'aval de l'aménagement, en fonction de leur taille (Lt en mm). 40

Figure 18 : Nombre de nouveaux poissons détectés chaque jour, uniquement ceux d'origine aval de la buse, en fonction du débit moyen journalier (en m³/s en haut) et de la température moyenne journalière (en °C, en bas). Les flèches rouges indiquent les dates de marquage. . 41

Figure 19 : Estimation des taux de détections lors des 7 campagnes de suivi mobile et taux de détections cumulé (courbe grise). Le nombre de poissons marqués utilisé comme référence pour le calcul des proportions est représenté en pointillés. 43

Figure 20 : Répartition en pourcentage des poissons détectés sur chaque tronçon au cours des sept prospections mobiles. En bleu : tronçons situés sur le secteur d'étude initial (zone de marquage), en vert : tronçons situés hors de la zone de marquage. Les lignes pointillées représentent la localisation des deux autres ouvrages transversaux présents sur le linéaire d'étude. 44

Figure 21 : Géolocalisation des détections individuelles obtenues au cours des sept prospections mobiles. 45

Figure 22 : Répartition par classes de distance des poissons détectés sur le tronçon 17 en aval immédiat de la buse au cours des sept prospections mobiles. 46

Figure 23 : Effectifs clés à retenir concernant la détection des poissons sur la zone d'étude et réflexion concernant leur statut. 46

Figure 24 : Box-plot présentant les distances parcourues entre chaque nouvelle détection pour les truites recapturées vivantes, et les poissons ayant effectués des déplacements vers l'amont et toutes les marques réunies..... 47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Statistiques de débits de la Durolle au droit de la buse utilisée pour le calage hydraulique du dispositif de franchissement..... 11

Tableau 2 : Statistiques descriptives des tailles (Lt) de truites marquées au cours des deux sessions de marquage et en fonction de leur lieu d'origine (amont-aval buse)..... 15

Tableau 3 : Caractéristiques des prospections mobiles réalisées entre mai 2018 et août 2019. 23

Tableau 4 : Statistiques descriptives des chroniques annuelles de débit et de température enregistrées entre 2017 et 2019..... 29

Tableau 5 : Principaux résultats concernant le franchissement de la buse par les poissons marqués..... 32

Tableau 6 : Synthèse des effectifs (et proportions associées) de truites ayant franchi la buse en fonction de leur année de marquage et de leur origine (n total=165)..... 36

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les obstacles à la libre circulation des poissons en rivière peuvent limiter l'accès à certains habitats essentiels à la survie des individus et porter préjudice à la fonctionnalité naturelle des populations. Ces dix dernières années, de nombreuses mesures réglementaires ou non ont été initiées pour restaurer la continuité piscicole, écologique, mais aussi sédimentaire sur les cours d'eau dans le but de réduire les impacts des ouvrages sur les milieux et les populations. Les cours d'eau à truite sont notamment ciblés par les mesures de restauration. Au cours de son cycle de vie, la truite commune peut développer des comportements migratoires pour accéder à des habitats de reproduction, de grossissement ou de refuge. Les entraves à la migration peuvent donc impacter la reproduction naturelle et les flux de gènes, et sont susceptibles de fragiliser la population sur le long terme.

La Durolle est une rivière salmonicole située en tête de bassin, qui abrite une population de truites fonctionnelle et abondante (FDPPMA63 com. pers.). L'ouvrage hydraulique OH 448 permet à l'autoroute A89 de franchir la Durolle au niveau de la commune de St-Rémy sur Durolle. Il s'agit d'un aménagement ancien datant de la construction de l'A72 en 1978. Cet ouvrage est constitué d'une buse de type ARMCO en tôle ondulée, longue de 104 mètres et présentant une pente de 1%. Il représentait un obstacle infranchissable (FDPPMA63 comm. pers.) pour les truites en raison des conditions d'écoulement à l'intérieur de la buse : vitesses de courant trop élevées et homogènes, absence de zones de repos (abris hydrauliques).

En 2016, des travaux ont été entrepris afin de rétablir la continuité piscicole au droit de cet ouvrage en permettant aux truites de franchir la buse de l'aval vers l'amont. Un dispositif hydraulique unique constitué d'une semelle rugueuse et de ralentisseurs préfabriqués a été aménagé à l'intérieur de la buse pour rendre les conditions d'écoulement compatibles avec les capacités natatoires de la truite commune. Des travaux complémentaires en aval immédiat de la buse ont été menés pour réduire l'artificialisation du lit et ainsi faciliter l'accès des poissons à la buse aménagée.

L'objectif du projet est d'évaluer la fonctionnalité de ces aménagements sur le plan biologique en mesurant la franchissabilité de la buse par les poissons. Le franchissement en montaison a été étudié au cours de 2 cycles de migration, entre juillet 2017 et août 2019, en utilisant la technologie RFID et en suivant les déplacements d'individus marqués à l'aide de transpondeurs.

Ce projet ne s'inscrit pas dans une obligation réglementaire, il s'agit d'une action volontaire de Vinci Autoroutes.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Design général de l'étude

Globalement, le protocole de l'étude a consisté à :

- Marquer des individus de la population de truites en aval de la buse à l'aide de puces magnétiques appelées transpondeur ;
- Déterminer la quantité d'individus marqués ayant franchi la buse grâce à un dispositif de détection automatique localisé en amont immédiat de la buse ;
- Localiser le maximum d'individus marqués à l'aide d'opérations répétées de prospections mobiles sur un linéaire de rivière défini pour caractériser leurs comportements de déplacements en lien avec la présence de la buse ;
- Analyser les données de franchissement en lien avec les caractéristiques des individus et deux facteurs environnementaux : l'hydrologie et la température de l'eau.

2.2 Présentation du site d'étude et des particularités du linéaire étudié

2.2.1 Présentation de la Durolle et du site d'étude

La Durolle, longue de 32 kilomètres, est située dans les départements de la Loire et du Puy-de-Dôme, en région Auvergne-Rhône-Alpes. Elle prend sa source à 815 mètres d'altitude sur la commune de Noirétable dans les monts du Forez et conflue en rive droite de la Dore en aval de Thiers. Elle fait partie du bassin de l'Allier et de la Loire.

Son bassin hydrographique présente une superficie de 1 456 km² (Fiches cours d'eau SANDRE 2010). Son hydrologie est caractérisée par un module estimé à 3 m³/s à l'exutoire du bassin versant, un étiage estival prononcé avec des débits pouvant descendre jusqu'à 0.05 m³/s et une période de hautes eaux en automne et au printemps avec des crues jusqu'à 80 m³/s.

La buse de l'A89 qui fait l'objet du suivi se situe dans la moitié amont de la Durolle à 12.7 km de la source.

L'objectif de l'étude étant d'évaluer le franchissement vers l'amont de la buse, le suivi des déplacements de truites s'est principalement focalisé au droit de celle-ci en intégrant un certain linéaire de rivière de part et d'autre.

Sur le linéaire concerné, deux secteurs d'étude ont été définis comme suit :

Un secteur d'étude principal sur lequel ont eu lieu les marquages de poisson, et l'intégralité des suivis par prospection mobile. Ce secteur s'étend sur un linéaire total de 2240 mètres, dont 1730 mètres situés en aval de la buse et 405 mètres en amont. Le secteur est limité en aval par un obstacle infranchissable et en amont par le pont situé sur le chemin de « La Goutte du Mouchon ».

Un secteur d'étude étendu sur lequel ont été réalisés des suivis mobiles complémentaires dans le but de localiser le maximum d'individus marqués sortis de la zone d'étude principale. Ce secteur prolonge le secteur principal de 830 mètres vers l'aval et de 150 mètres vers l'amont soit un linéaire total de 3200 mètres.

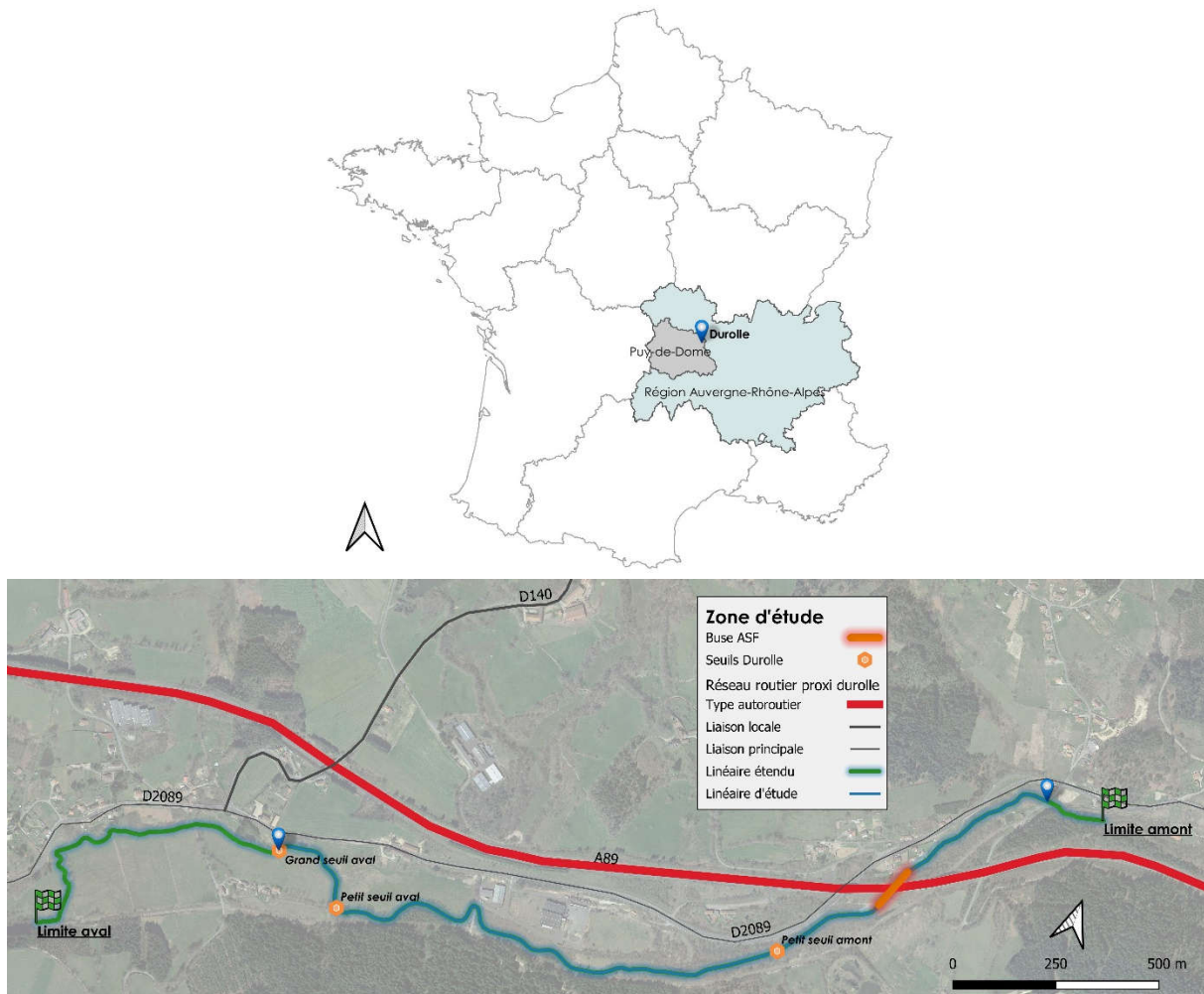


Figure 1 : Localisation de la Durole dans le département du Puy-de-Dôme (63, en haut) et du linéaire d'étude au regard du réseau routier/autoroutier local (en bas). En bleu : le secteur d'étude principal, en vert le secteur étendu vers l'aval et l'amont.

2.2.2 Discrétisation spatiale et schématisation du linéaire d'étude

Pour faciliter la présentation des données, la totalité du linéaire d'étude a été découpée en 22 tronçons. Leurs limites ont été déterminées de manière à remplir les critères suivants :

- Longueurs de tronçons d'environ 150 m ;
- Limites de tronçons calées sur les obstacles présents sur le linéaire (petits seuils, grand seuil et buse) ;
- Les limites amont/aval sont calées pour considérer la totalité des linéaires parcourus lors des suivis mobiles (cf. le chapitre 2.5).

Ainsi, en considérant ces critères, le plus petit tronçon (n°19) mesure 57 m, le plus grand (n°7) 247 m, pour une longueur moyenne de 146 m (ET=37 m).

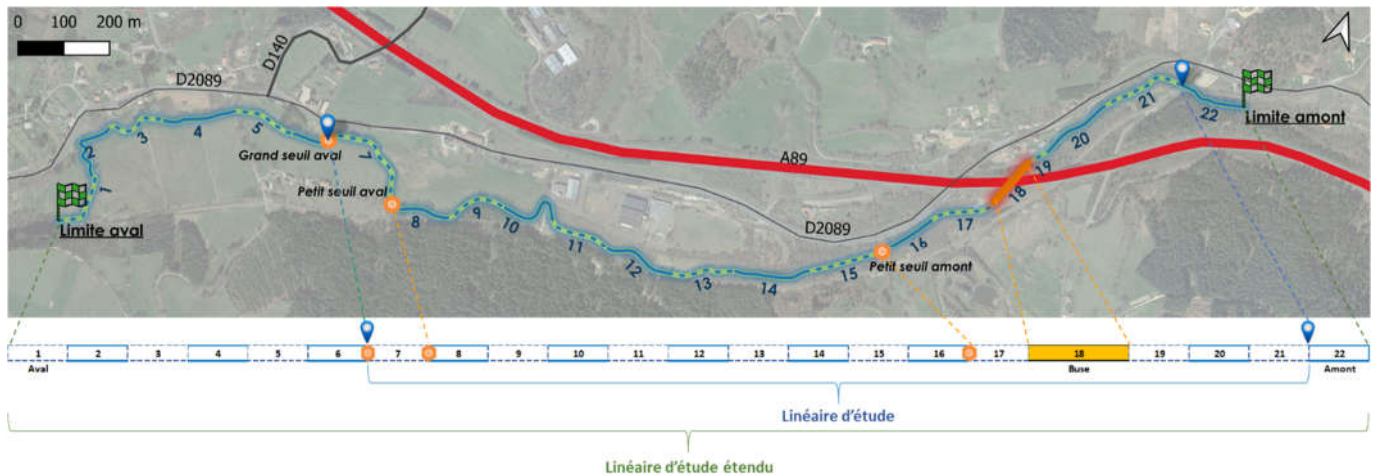


Figure 2 : Localisation des tronçons d'étude le long du linéaire de la Durolle (carte en haut) et schématisation de ce linéaire par un découpage des tronçons (tableau en bas).

2.2.3 Présentation de la buse et des aménagements réalisés

L'ouvrage hydraulique OH 448 de l'A89 est constitué d'une buse métallique de type ARMCO en tôle ondulée longue de 104 mètres avec une pente de 1%. En aval de la buse, l'ouvrage se complétait initialement par une artificialisation du lit sur une dizaine de mètres avec la présence d'un radier et d'un petit seuil béton.

Avant les travaux d'aménagement, cet ouvrage était considéré comme totalement infranchissable à la montaison pour la truite commune, espèce cible sur la Durolle. En effet les conditions d'écoulements au droit de l'ouvrage étaient incompatibles avec les exigences de l'espèce pour les raisons suivantes :

- Lamé d'eau trop faible dans la buse en période d'étiage ;
- L'augmentation des débits se traduisait rapidement par des vitesses de courant trop importantes, de l'ordre de plusieurs mètres par seconde ;
- L'absence d'abris hydraulique pouvant servir de zone de repos sur une longueur de plus de cent mètres ;
- La présence d'une petite chute en sortie de la buse.

Afin de rétablir la continuité piscicole au droit de cet ouvrage, des travaux ont été réalisés en été 2016.

Un dispositif hydraulique unique constitué d'une semelle rugueuse et de ralentisseurs préfabriqués a été aménagé à l'intérieur de la buse pour rendre les conditions d'écoulement compatibles avec les capacités natatoires de la truite commune. Ce dispositif a permis d'augmenter la lame d'eau dans la buse, de réduire les vitesses de courant, de rendre plus hétérogènes les écoulements et de créer des abris hydrauliques ;

La suppression du radier et du seuil béton à l'aval de la buse est venue compléter l'aménagement pour faciliter l'accès des poissons à la buse aménagée.

Lors des études hydrauliques, les dispositifs de franchissement sont théoriquement calés pour permettre de respecter au mieux les exigences de la truite en termes de vitesse de courant et de hauteurs d'eau pour une gamme de débits comprise entre le QMNA5 et deux fois le module. Dans le cas de la buse OH448, les simulations lors de la phase étude ont conduit à retenir la gamme de débits Q10%-Q90% comme plage préférentielle de fonctionnement pour le franchissement par la truite.

Tableau 1 : Statistiques de débits de la Durolle au droit de la buse utilisée pour le calage hydraulique du dispositif de franchissement.

Gamme de débits	m ³ /s
QMNA5	0,18
Q10%	0,78
Module	1,00
Q90%	1,19
2,5x module	2,50



Planche photographique 1 : Vue aval de la buse, avant (à gauche) et après (à droite) les travaux. Source ASF.



Planche photographique 2 : Vue amont de la buse, avant (à gauche) et après (à droite) les travaux. Source ASF.



Planche photographique 3 : Macro-rugosités implantées dans la buse.



Planche photographique 4 : Hétérogénéité des écoulements générée par les macro-rugosités.

2.3 Principe de la technologie RFID utilisée

La RFID (*Radio Frequency Identification*) est une technologie qui permet de récupérer des données à distance en communiquant par des ondes radio basses fréquences.

Les transpondeurs passifs ou PIT-tags (*Passive Integrated Transponder*) sont des petites marques constituées d'une antenne et d'un condensateur associés à une puce électronique qui fonctionnent à une longueur d'onde de 134,2 kHz. Elles sont encapsulées dans du verre et sont conformes au marquage biologique. Elles peuvent donc être utilisées pour le marquage interne d'animaux comme les poissons.



Planche photographique 5 : Exemple de différentes tailles de transpondeurs passifs utilisées pour le marquage des poissons.

Chaque transpondeur est caractérisé par un identifiant unique ce qui permet d'identifier individuellement tous les individus marqués. L'identification des poissons marqués se fait lors de son passage à proximité d'une antenne de détection. Les transpondeurs n'ont pas besoin de batterie pour fonctionner, leur durée de vie est donc illimitée. Ils se chargent de manière passive par induction grâce à une impulsion magnétique transmise par l'antenne reliée à un boîtier lecteur-enregistreur RFID. Cette impulsion charge le condensateur du transpondeur qui en réponse émet son numéro d'identification qui est enregistré par le lecteur-enregistreur en même temps que la date et l'heure de son émission.

La technologie dite HDX (half duplex) permet sur une même antenne d'alterner très rapidement les phases d'émission et de réception. Le système effectue 10 cycles de lecture par seconde afin de maximiser les chances de détection (Figure 3).

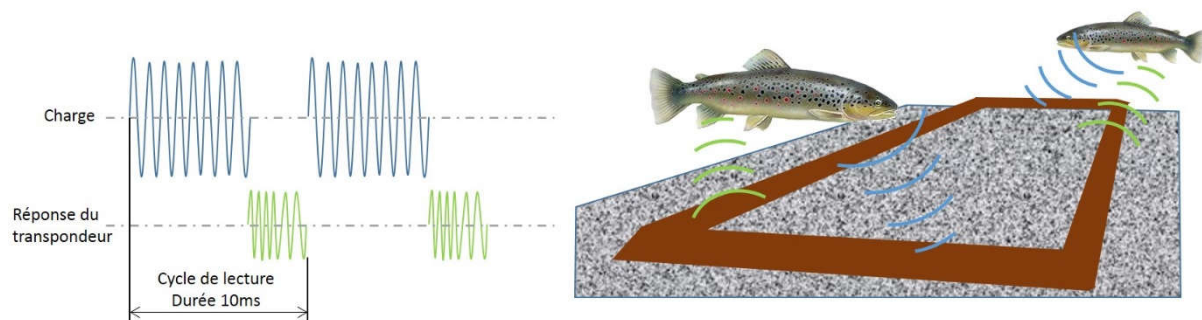


Figure 3 : Illustration du principe de la technologie HDX.

Les poissons marqués peuvent être détectés soit au niveau d'antennes fixes judicieusement placées (sortie d'ouvrage de franchissement, zone naturelle de radier) soit lors de prospections actives à pied en utilisant des antennes portatives couplées à un GPS pour enregistrer les coordonnées des individus détectés.

2.4 Opérations de marquage de poissons

2.4.1 Capture et marquage des poissons

Chaque année, en 2017 et 2018, une opération de capture et de marquage de truites a été menée sur l'ensemble du linéaire d'étude. Les captures ont été réalisées par pêche électrique de sondage à l'aide d'un appareil de pêche portatif. Les opérations ont eu lieu en période d'étiage en début ou fin d'été en prenant soin d'éviter les périodes de forte chaleur afin de rester dans des gammes de températures d'eau pas trop élevées et compatibles avec le marquage (<16°C). Les marquages ont eu lieu du 21 au 24 août en 2017 et du 8 au 10 juillet en 2018.

Une fois capturés, les poissons ont été stabulés dans la rivière à l'aide d'un vivier. Chaque individu a été anesthésié dans un bain d'eugénol (Keene et al. 1998), mesuré (longueur totale au mm près) puis marqué avec un transpondeur. Pour ce faire, la peau a été incisée à l'aide d'un scalpel puis la marque a été introduite dans la cavité péritonéale (Baras et al. 1999).

La taille des marques utilisées a été adaptée à la taille des poissons. Conformément aux recommandations de la littérature (Acolas et al. 2007; Brown et al. 1999; Richard et al. 2013), les truites de taille inférieure à 120mm (longueur totale) ont été marquées avec des transpondeurs 12mm (0,1g) et les truites de taille supérieure à 120mm avec des transpondeurs de 23mm (0,6g).

L'opérateur responsable du marquage a veillé à limiter à un maximum de 30 secondes la durée totale de la manipulation hors d'eau des poissons.

Après marquage, les individus ont été stabulés dans un bac de réveil le temps qu'ils retrouvent toute leur capacité natatoire avant d'être libérés dans la rivière.

La température de l'eau dans les bacs d'anesthésie et de réveil a été contrôlée en continu afin d'éviter des différences avec la température de la rivière de plus de 1°C. Dans tous les cas, aucun marquage n'a été réalisé à une température d'eau supérieure à 16°C (Baras et al. 1999; Jepsen et al. 2002).

Le protocole mis en place respecte l'ensemble de la réglementation en vigueur en termes de capture et de marquage d'animaux à des fins scientifiques. Les captures ont été réalisées conformément à l'arrêté de pêche scientifique obtenu (signé en date du 28 juin 2017). Le protocole de marquage a été validé par le comité d'éthique CECCAPP de Lyon, réalisé par des opérateurs habilités et le projet a reçu l'agrément du Ministère de la Recherche sous le numéro 10286.

Aucune perte de marque n'a été constatée immédiatement après marquage. La cicatrisation intervient rapidement au bout de quelques jours empêchant tout rejet de la marque par l'incision. Le taux de rétention post-marquage chez la truite commune pour des individus de taille supérieure à 100mm est proche de 100% (Vatland et Caudron 2015).

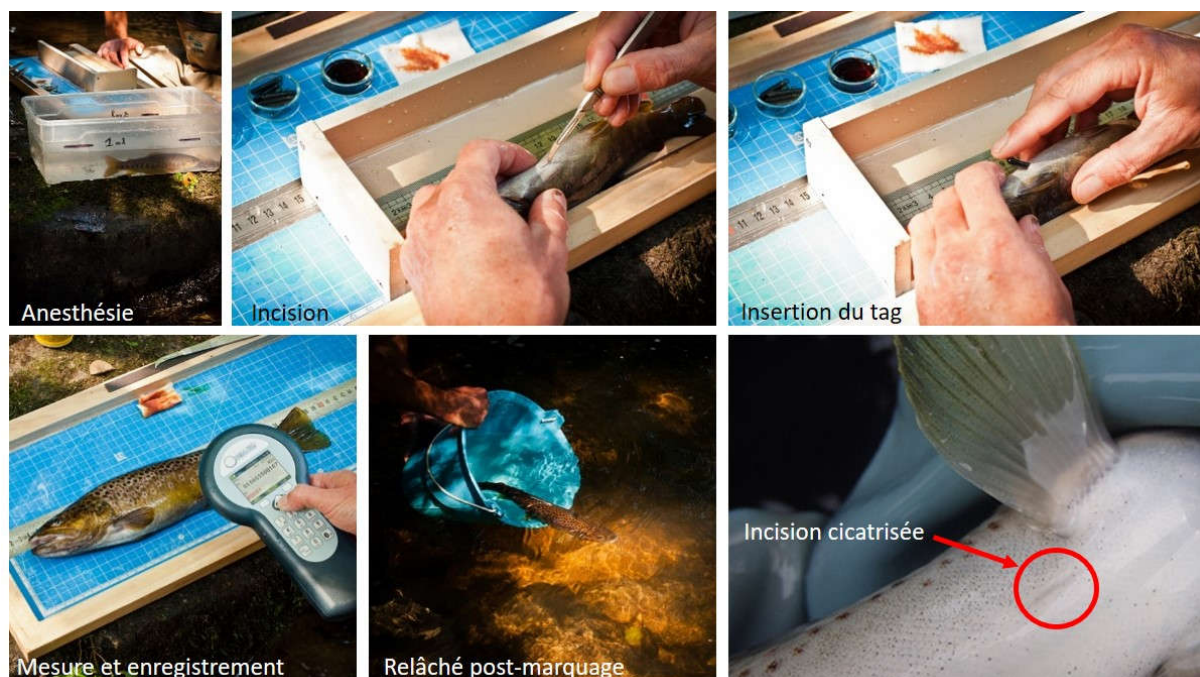


Planche photographique 6 : Illustration des différentes étapes de marquage des poissons dans le cadre du présent suivi et vue d'une incision cicatrisée (photo provenant d'un autre suivi).

2.4.2 Caractérisation de la population de truites marquées

Au total, sur les deux années, 815 truites ont été marquées dont 435 en 2017 et 380 en 2018 : 54 truites ont été marquées avec des transpondeurs 12 mm et 761 truites avec des transpondeurs 23 mm.

La structure en taille des poissons marqués chaque année et selon leur origine est présentée dans la Figure 4.

Le Tableau 2, détaille quelques statistiques descriptives de ces structures de taille en considérant l'année de marquage et l'origine des truites.

Tableau 2 : Statistiques descriptives des tailles (Lt) de truites marquées au cours des deux sessions de marquage et en fonction de leur lieu d'origine (amont-aval buse).

Variables Lt (mm)	2017	2018	Amont	Aval	Total
n	435	380	99	716	815
Min	112	103	114	103	103
Médiane	165	151	164	153	155
Moyenne	177	163	173	165	166
ET	40	35	40	39	39
Max	350	332	301	350	350
Tests U de Mann-Whitney	W=115941, p<0.001		W=30069, p=0.017		

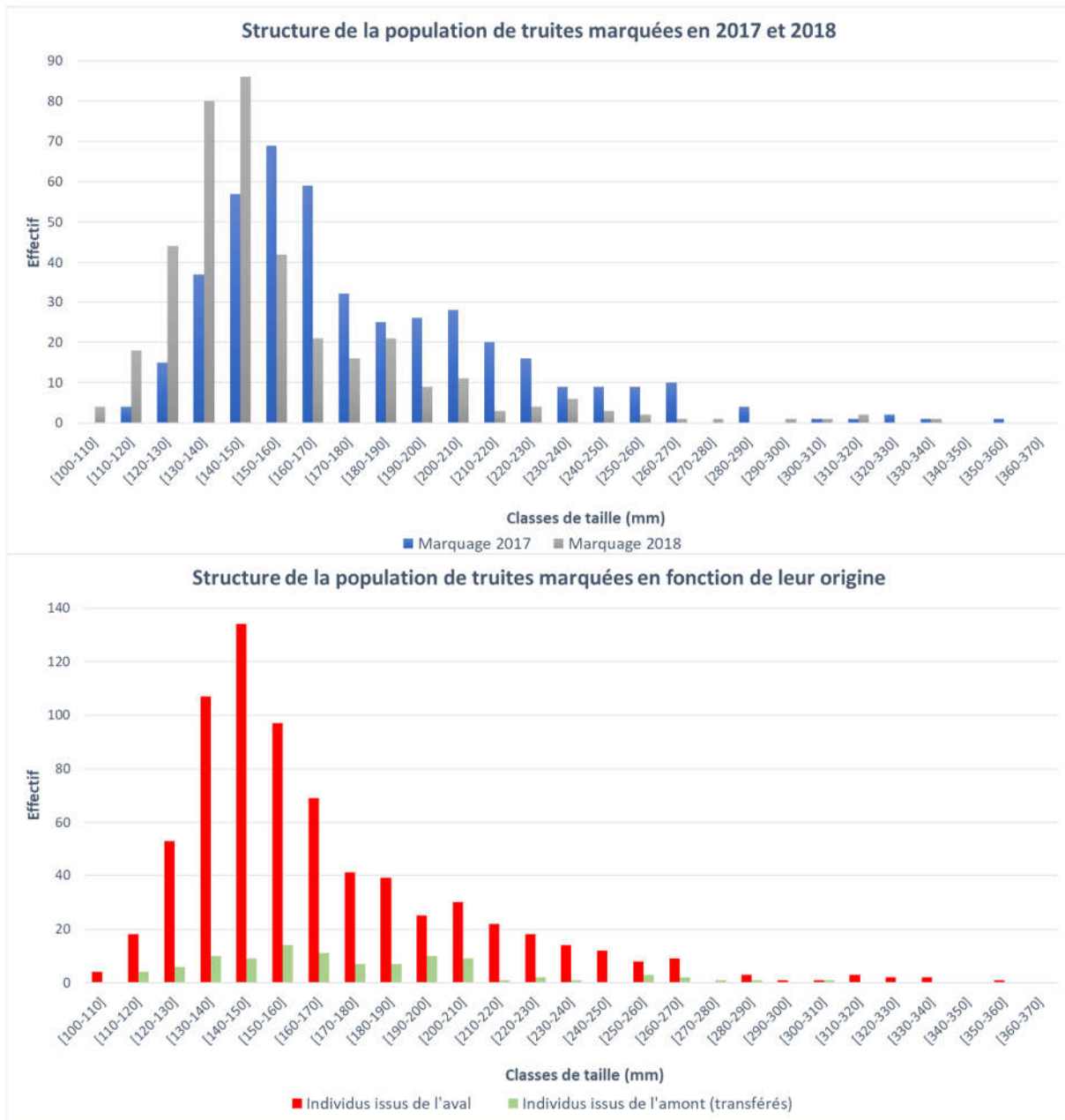


Figure 4 : Structures en tailles de la population de truites marquées (Lt en mm) en fonction de l'année (en haut) ou de l'origine des individus (en bas).

Les distributions en tailles des truites ont été comparées en fonction de l'année de marquage et de leur origine. Des tests *U de Mann-Whitney* ont été réalisés, en considérant une *p-value* distinctive équivalente à 0.05 (Tableau 2).

La différence de taille des individus entre années de marquage s'explique par un nombre plus important d'individus de grande taille marqués en 2017 comme le montre la moyenne des individus marqués qui est de 177 mm en 2017, contre 163 mm en 2018 (Tableau 2).

La différence observée entre les distributions de taille en fonction de l'origine géographique des poissons (amont-aval buse), s'explique par le fait que les poissons issus de l'amont sont en moyenne plus grands (173 mm contre 165 mm pour les poissons issus de l'aval) (Tableau 2). À noter aussi que les individus ayant une taille comprise entre 170 et 210 mm sont mieux représentés dans la distribution des truites issues de l'amont.

2.4.3 Stratégie de relâcher des poissons

Sur les 11 tronçons concernés en aval de la buse, les opérations de capture et de marquage ont été réalisées en mode itinérant de l'aval vers l'amont par une équipe de 3 à 4 personnes. En pratique, une fois qu'une quinzaine de poissons étaient capturés, les opérateurs s'arrêtaient pour les marquer et les relâcher sur le tronçon pêché. Au total, 373 individus en 2017 et 343 en 2018 ont été capturés, marqués puis relâchés à l'aval de la buse selon cette procédure. On peut donc considérer que la répartition spatiale des individus marqués sur les 1680 mètres en aval de la buse est représentative des abondances de poissons présents sur chaque tronçon.

En complément quelques poissons ont été capturés en amont de la buse sur les tronçons 19, 20 et 21 puis transférés après marquage sur le tronçon 17 en aval de la buse dans le but de forcer le comportement de migration vers l'amont. Dans ce protocole, on pose l'hypothèse que les poissons prélevés en amont de la buse chercheront à retourner dans leur habitat d'origine et donc devraient davantage tenter de franchir la buse que les individus capturés en aval. Les individus transférés sont au nombre de 62 en 2017 et 37 en 2018 soit respectivement 14% et 10% du nombre total de poissons marqués.

La répartition des poissons marqués et relâchés sur le secteur d'étude est illustrée dans la Figure 5.

Evaluation du franchissement piscicole de la buse OH448 de l'A89

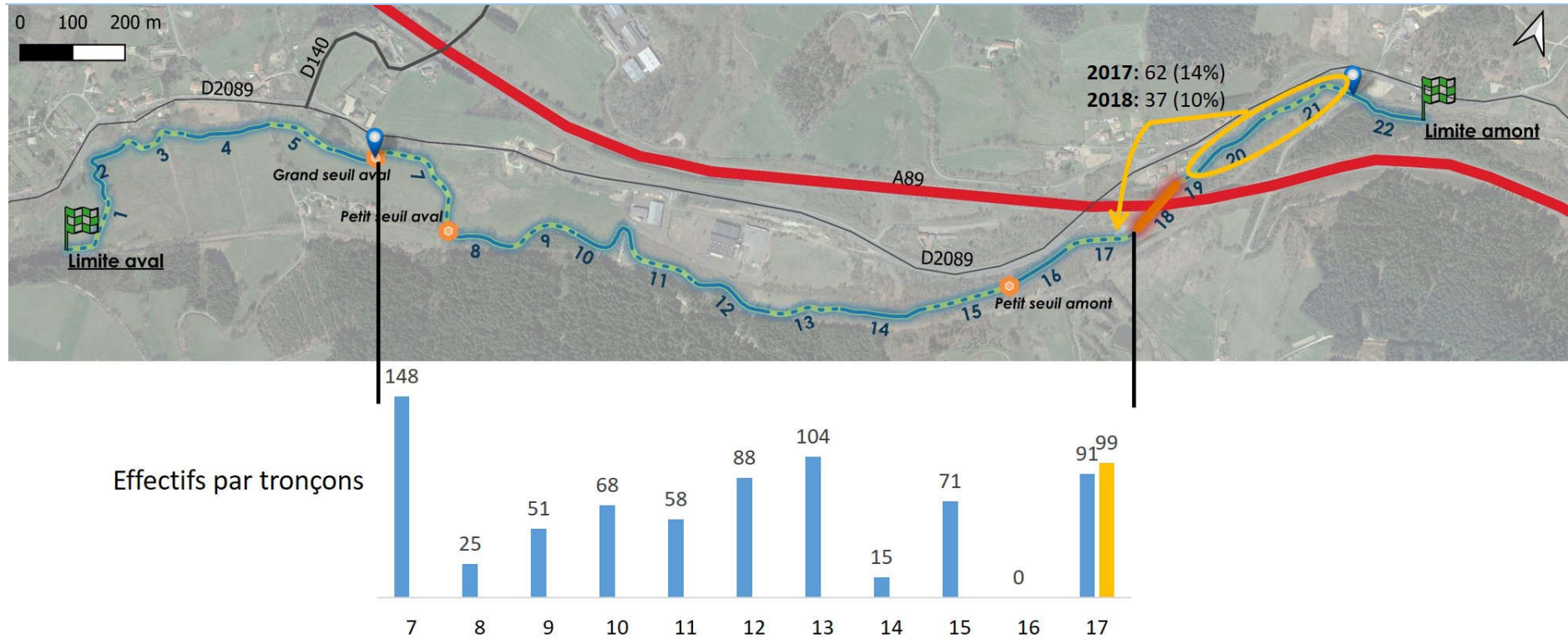


Figure 5 : Répartition des effectifs totaux de truites relâchées au cours des deux campagnes de marquage. En orange, les quantités transférées depuis l'amont de la buse.

2.5 Dispositif fixe de suivi installé en amont de la buse

2.5.1 Présentation du dispositif

En juillet 2017, préalablement à la première campagne de marquage, un dispositif fixe destiné à détecter les poissons marqués a été installé en amont immédiat de la buse. Ce dispositif est resté opérationnel en permanence pendant toute la durée du suivi soit jusqu'en août 2019. Il était composé :

- D'une alimentation électrique très basse tension (18V) avec un branchement sur réseau électrique domestique chez un riverain ;
- De deux lecteurs/enregistreurs RFID permettant d'enregistrer les passages de poissons;
- De deux antennes de détection, une par lecteur/enregistreur, fixées dans le lit de la rivière permettant de détecter les poissons marqués ;
- De deux « tuners », un par antenne, permettant de régler l'antenne et d'optimiser la distance de détection ;
- D'un câble twinax permettant la communication entre chaque antenne et son lecteur;
- De deux « marker tags » (ou marques témoins), une par antenne, programmés pour être détectés toutes les 30 minutes qui servent à contrôler le bon fonctionnement des antennes ;
- D'un module par lecteur/enregistreur de transfert des données à distance afin de pouvoir réaliser une veille quotidienne sur le fonctionnement du dispositif.

Ce dispositif a été conçu avec toutes les précautions nécessaires pour pouvoir fonctionner en continu pendant deux ans avec l'objectif de limiter au maximum le risque de perte d'information. Ainsi, le système composé de deux antennes installées à 25 mètres l'une de l'autre a permis d'optimiser la probabilité de détection globale. Le fait de relier chaque antenne à un lecteur/enregistreur différent maximise le temps d'interrogation des antennes et permet de limiter les risques de pertes de données en cas de dysfonctionnement d'un lecteur/enregistreur. La conception sur-mesure des antennes a permis d'obtenir une distance de détection des transpondeurs très satisfaisante, d'environ 85 cm au-dessus des antennes. Les antennes ont été installées sur des têtes de radiers où les hauteurs d'eau sont les plus faibles.

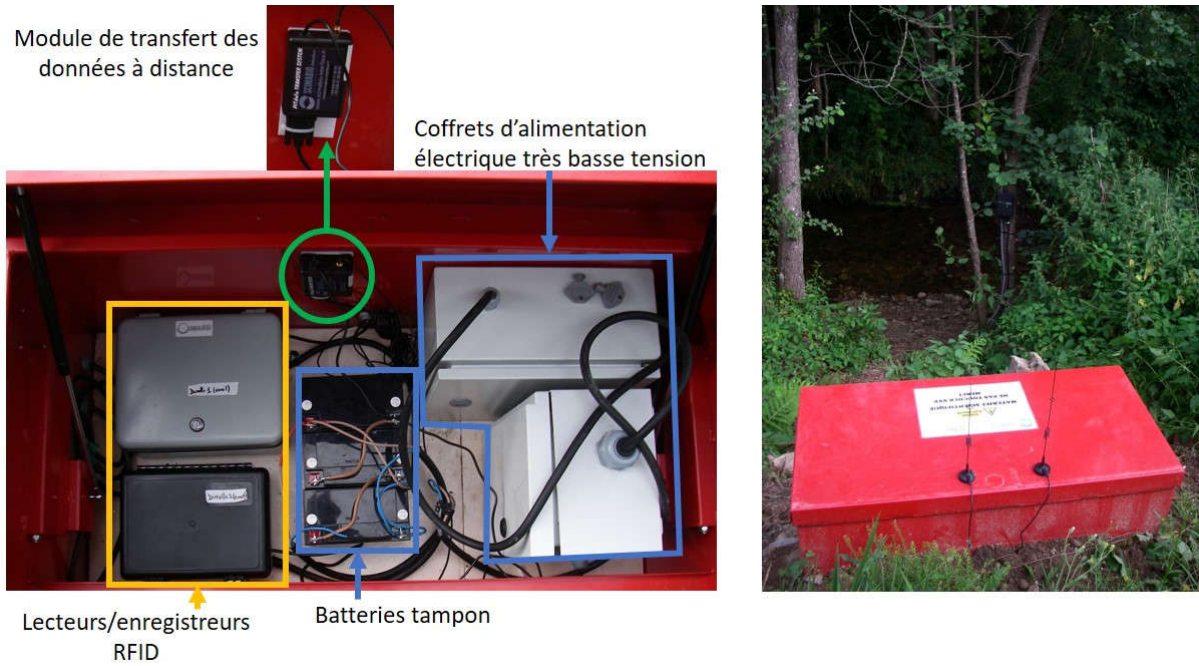


Planche photographique 7 : les éléments du dispositif sécurisés dans un coffre métallique à proximité des antennes.



Planche photographique 8 : Illustration des différentes étapes d'installation des antennes de détection.



Planche photographique 9 : Illustration de la partie boîtier tuner du dispositif.



Planche photographique 10 : Vue des deux antennes installées : antenne 1 aval à gauche et antenne 2 amont à droite.

2.5.2 Caractérisation de la probabilité de détection

Avec les données de détection obtenues au niveau de chaque antenne, l'efficacité globale du dispositif fixe a pu être calculée. Il s'agit de la probabilité de détection des poissons marqués par le dispositif double antenne, pendant toute la période de l'étude.

Le calcul a été réalisé selon la formule suivante d'après les recommandations de Zydlewski et al. (Zydlewski et al. 2006) :

$$Eff_{ANT_1} = (d_{COMMUN\ ANT_{1+2}}) \times (d_{UNIQUE\ ANT_2} + d_{COMMUN\ ANT_{1+2}})^{-1}$$

Où Eff_{ANT_1} correspond à l'efficacité de détection calculée pour l'antenne 1

et d est le nombre de transpondeurs détectés.

Cette formule considère donc les transpondeurs détectés aux deux antennes pour estimer une efficacité de détection. Elle ne permet pas de considérer le cas particulier des poissons qui ont franchi l'antenne 1 et qui ne sont pas remontés jusqu'à l'antenne 2.

Ces probabilités (ou efficacités) permettent ensuite de calculer une efficacité combinée du dispositif ($Eff_{COMBINEE}$) qui est définie comme la proportion de transpondeurs ayant franchi le système de détection (système double antenne) et qui ont été détectés par au minimum une des deux antennes.

Le calcul de l'efficacité combinée ($Eff_{COMBINEE}$) de détection a été réalisé en suivant l'équation suivante :

$$Eff_{COMBINEE} = 1 - [(1 - Eff_{ANT_1}) \times (1 - Eff_{ANT_2})]$$

2.6 Campagnes de prospections mobiles

2.6.1 Présentation des campagnes

Au total sept campagnes de prospection mobile ont été réalisées entre le 2 mai 2018 et le 1^{er} août 2019 dans le but de localiser le maximum de poissons marqués.

Les prospections ont été réalisées de l'aval vers l'amont à deux opérateurs munis chacun d'un lecteur/enregistreur RFID et d'une antenne portative. L'antenne portative émet un champ magnétique dont la portée dépend de la taille des transpondeurs : environ 40-50 cm pour les transpondeurs 12mm et 75 cm pour les transpondeurs 23mm (Figure 6). Un GPS synchronisé avec les lecteurs/enregistreurs a permis de connaître la position de chaque transpondeur détecté avec une précision de l'ordre de 10 mètres.

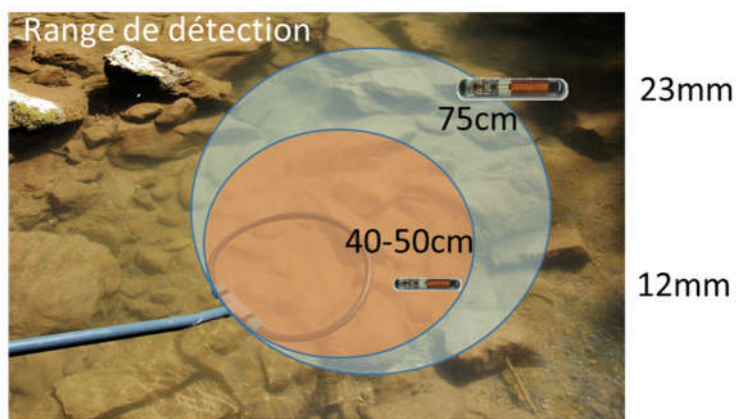


Figure 6 : Illustration des portées de détection estimées en fonction de la taille des transpondeurs utilisés.

Les caractéristiques de ces prospections sont présentées dans le Tableau 3 et la Figure 7.

Tableau 3 : Caractéristiques des prospections mobiles réalisées entre mai 2018 et août 2019.

Date	Q moyen journalier (m³/s)	Tronçons prospectés
02/05/2018	1.06	7-->21
27 et 28/06/2018	0.94	7-->21
21/08/2018	0.20	4-->21
14 et 15/11/2018	0.38	6-->21
05/06/2019	0.31	7-->21
02/07/2019	0.23	7-->21
01/08/2019	0.17	1-->22

Le secteur d'étude principal (tronçons n°7 à 17) a été parcouru pendant les 7 campagnes. Un linéaire supplémentaire en aval et en amont a été parcouru au cours de quelques campagnes pour étendre la zone de suivi.

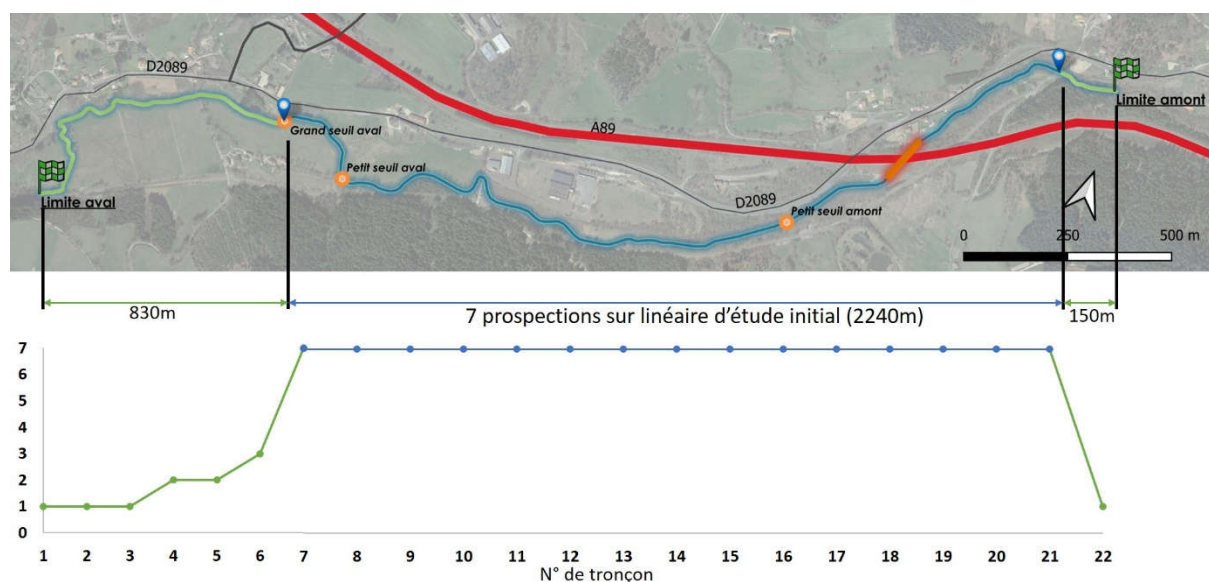


Figure 7 : Illustration des efforts de suivis mobiles au sein des différents tronçons d'étude. Pour rappel, le secteur d'étude initial est délimité par les balises bleues.

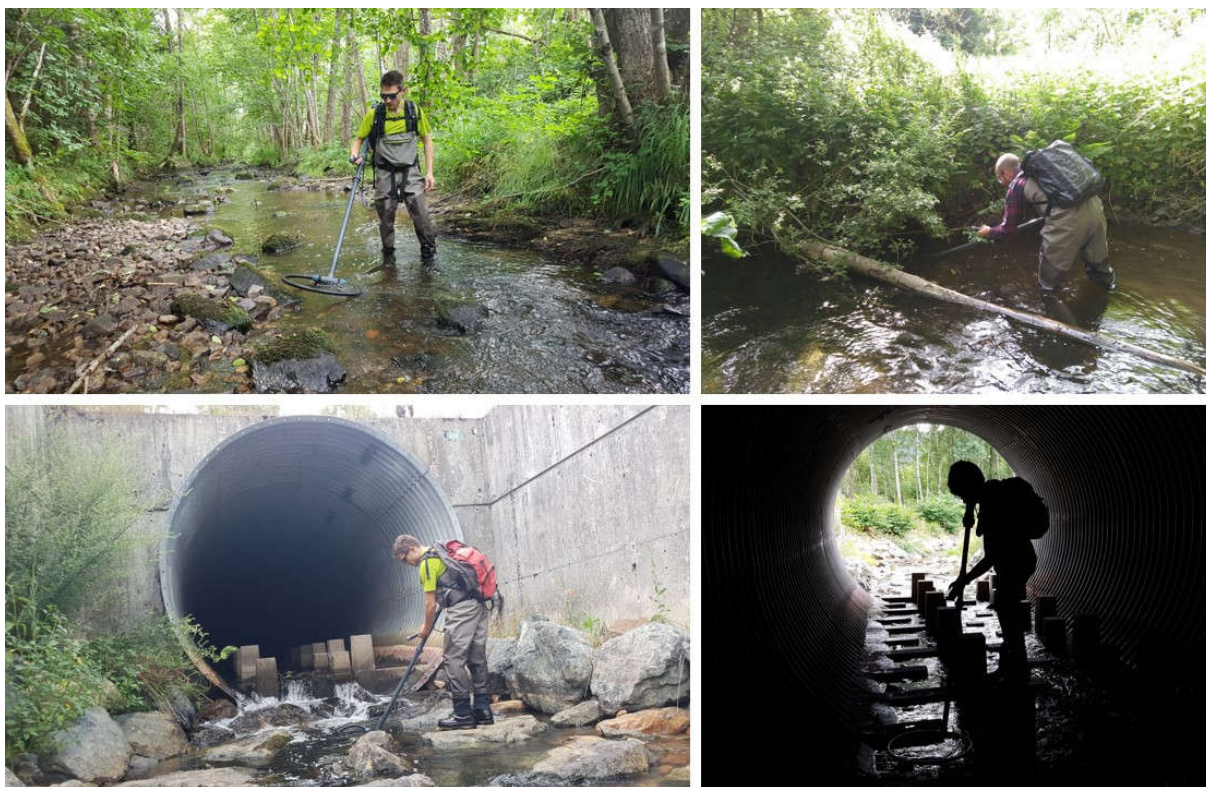


Planche photographique 11 : Illustration de la recherche de poissons marqués par prospection mobile.

2.6.2 Estimation du taux de détections cumulées

À l'issue de chaque campagne de prospection mobile, un taux de détections cumulées a été calculé. Ce taux correspond au cumul des effectifs de poissons marqués détectés au cours des suivis mobiles, ramené au nombre maximal de transpondeurs potentiellement détectable au moment du suivi mobile (prise en compte du nombre total de poissons marqués au moment dudit suivi). Ainsi, le taux maximal de détections (100%) est considéré si la totalité des poissons marqués (c.-à-d. relâchés dans le milieu) est détectée à l'issue des 7 campagnes de suivi mobile.

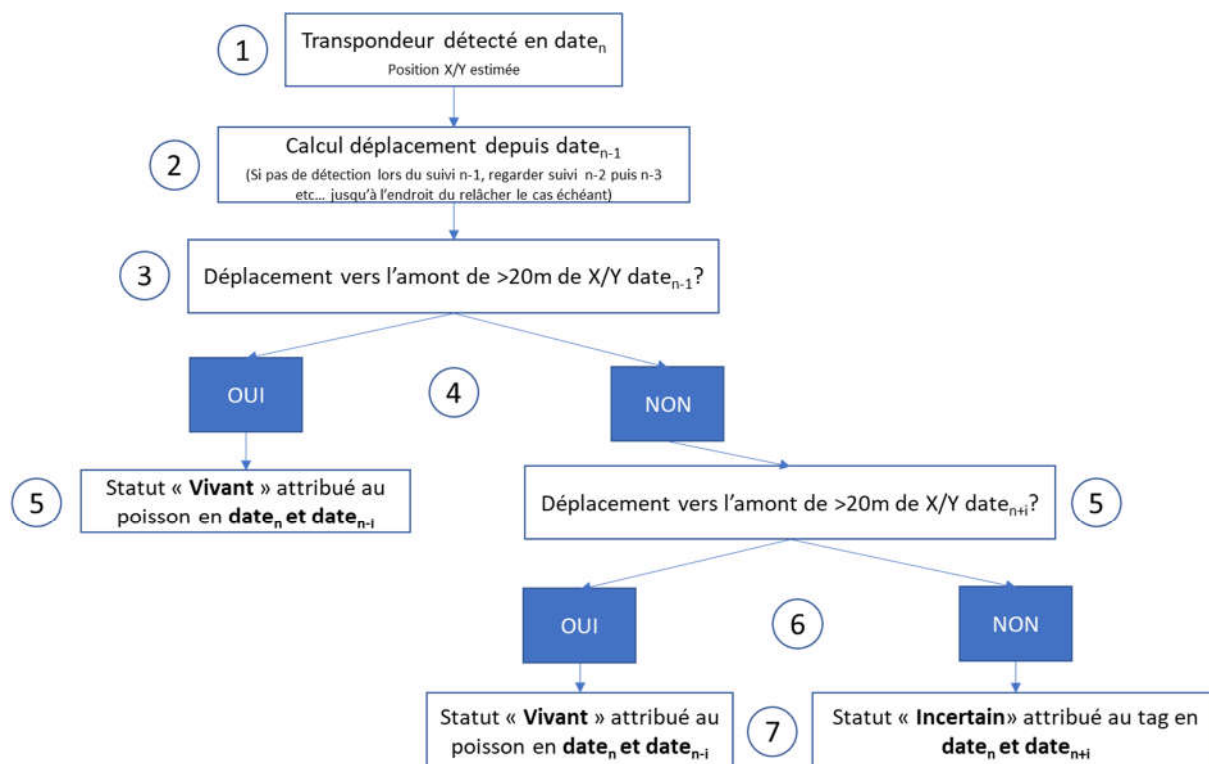
À noter que si un individu marqué a été uniquement détecté lors d'une unique campagne de suivi (par exemple la première), celui-ci est toujours pris en compte dans le calcul du taux de détections cumulé lors des campagnes suivantes.

Pour le cas particulier de la troisième prospection mobile, réalisée juste après la seconde campagne de marquage, un taux de détections cumulées a été calculé en ne considérant que les transpondeurs utilisés lors de cette seconde campagne (n=380). Ce calcul permet de traduire une efficacité de détection en limitant l'influence de la dévalaison (voire ponctuellement de montaison) des poissons sur le calcul. Ce calcul n'est pas possible pour les autres campagnes de suivi mobile.

2.7 Estimation du statut des transpondeurs détectés

Pour l'analyse des données, il est nécessaire de définir au moment de chaque détection par suivi mobile un statut pour chaque transpondeur détecté afin d'estimer si ce transpondeur peut être considéré comme un poisson vivant ou non. Les données de détection du système fixe et issues des suivis mobiles sont alors utilisées.

Le statut des transpondeurs détectés a été défini en suivant l'arbre de décision suivant :



$date_n$ = moment de la détection considérée pour l'attribution du statut
 $date_{n-1}$ = moment direct précédent la date de détection considérée pour l'attribution du statut
 $date_{n-i}$ = énième moment précédent la date de détection considérée pour l'attribution du statut
 $date_{n+i}$ = énième moment suivant la date de détection considérée pour l'attribution du statut

Figure 8 : Arbre de décision d'attribution d'un statut à un transpondeur détecté.

Par cette démarche nous essayons de savoir si un transpondeur peut être considéré comme un poisson encore vivant ou alors s'il doit être considéré comme un transpondeur au statut incertain (transpondeur perdu par le poisson ou poisson mort). La distinction entre un transpondeur perdu et un poisson mort est impossible puisque les transpondeurs ne sont pas récupérés. Nous garderons donc ce double statut lorsque nous ne sommes pas capables d'attester que le poisson est vivant.

Lors de la détection d'un transpondeur à une $date_n$ (par le système fixe ou lors d'un suivi mobile), on calcule la distance parcourue depuis la dernière observation. Si cette détection est la première en date, on utilise la position de relâcher du poisson comme première observation. Si la distance est >20 m et le déplacement orienté vers l'amont, on attribue à la détection (et donc au transpondeur à la $date_n$) le statut « Vivant ». Si des détections antérieures existent, on attribut *de facto* le statut « Vivant » à ces détections (en $date_{n-i}$).

Si la distance parcourue est <20 m et/ou orientée vers l'aval, on s'intéresse aux détections postérieures existantes. Dans le cas où des détections postérieures existent et que les distances parcourues alors sont >20 m et orientées vers l'mont, le statut « Vivant » est attribué en $date_n$. S'il n'existe pas de détection postérieure ou que les distances calculées pour les détections postérieures existantes sont <20 m et/ou orientées vers l'aval, le statut « Incertain » est attribué au transpondeur à la $date_n$ et $date_{n+i}$.

3. CONDITIONS DU SUIVI / EFFICACITÉ DU DISPOSITIF

3.1 Chroniques de débit et de température

Le débit et la température ont été enregistrés tout au long de la période d'étude, à savoir de fin août 2017 à début août 2019. Le débit était enregistré au niveau de la station de Celles-sur-Durolle (K297031001) au pas de temps horaire. La température était enregistrée en amont de la buse à l'aide d'une sonde HOBO Data Logger 64k, tous les ¼ d'heure.

L'hydrogramme et le thermogramme de suivi sont présentés dans la Figure 9. Les campagnes de marquage (en rouge) et de suivi mobile (ou « tracking », en vert) sont également indiquées.

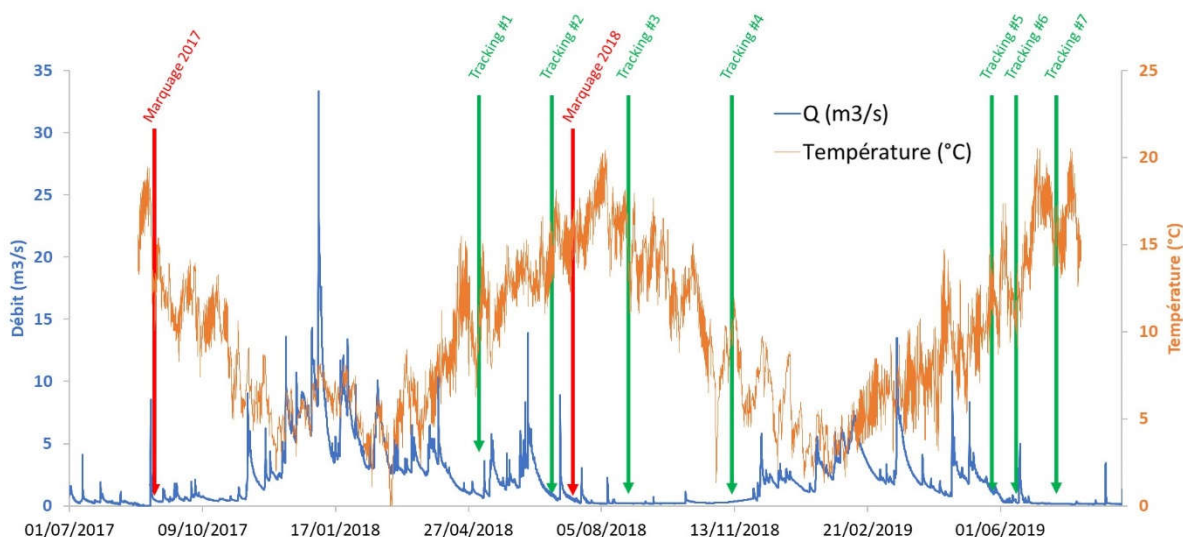


Figure 9 : Chroniques de débit et de température au regard des dates de marquages des poissons et de suivis mobiles. Les données présentées sont horaires pour les débits et des moyennes horaires pour les températures.

Durant les 3 années de suivis, l'hydrologie a été particulièrement hétérogène, avec une pointe de crue mesurée à 33.3 m³/s en décembre 2017 (entre la première campagne de marquage et le premier suivi mobile) et une succession de hautes eaux observées courant le printemps 2019 (entre 5 et 13 m³/s). Quelques statistiques descriptives du débit enregistré sont mentionnées dans le Tableau 4.

En ce qui concerne les températures, la première valeur importante a été enregistrée courant d'été 2018 (le 31 août) et culminait à 20.4°C. En 2019, le suivi thermique a permis d'enregistrer une température maximale de 20.5 °C, début juillet.

Tableau 4 : Statistiques descriptives des chroniques annuelles de débit et de température enregistrées entre 2017 et 2019.

Années	Variables	Débit (m3/s)	Température (°C)
	<i>Début suivi</i>	01/07/2017	21/08/2017
	<i>Fin de suivi</i>	31/08/2019	31/07/2019
	<i>Durée (j)</i>	791	709
2017	<i>Min</i>	0.1	2.0
	<i>Max</i>	14.3	19.5
	<i>Moyenne</i>	1.7	9.1
2018	<i>Min</i>	0.2	0.0
	<i>Max</i>	33.3	20.4
	<i>Moyenne</i>	2.3	10.1
2019	<i>Min</i>	0.1	1.3
	<i>Max</i>	13.5	20.5
	<i>Moyenne</i>	1.9	9.2
2017-2019	<i>Min</i>	0.1	0.0
	<i>Max</i>	33.3	20.5
	<i>Moyenne</i>	2.0	9.6

L'hydrogramme montre que les débits ont été très variables au cours des deux années de suivi, ce qui a permis d'évaluer le franchissement de la buse sous différentes conditions hydrologiques.

En ce qui concerne la température, les valeurs enregistrées sont compatibles avec le préférendum thermique de la truite commune, bien que les pointes de valeurs observées en été dépassent légèrement la température de confort de l'espèce, estimée à 19°C (Elliott et Elliott 2010).

3.2 Fonctionnement du dispositif fixe

3.2.1 Fonctionnement au cours du temps

La Figure 10 présente le nombre de détections journalières des « marker tags » pour chacune des deux antennes fixes implantées en amont de la buse. La chronique d’enregistrement de ces détections couvre la totalité de la période de suivi, soit 730 jours consécutifs.

Pour rappel, un « marker tag » est associé à chaque antenne et permet de contrôler le bon fonctionnement des antennes. Ils sont programmés pour être détectés toutes les 30 minutes.

On constate dans la Figure 10 que les antennes ont correctement fonctionné la grande majorité du temps, hormis quelques périodes courtes et très ponctuelles. En moyenne, l’antenne 1 a fonctionné 99.2% du temps (723.9 jrs cumulés de fonctionnement) et l’antenne 2, 97.4% du temps (711.3 jrs cumulés de fonctionnement).

Le principal arrêt de fonctionnement qui a affecté les deux antennes en même temps a pour origine une coupure générale de courant survenue à la suite d’un orage violent (durée de la coupure d’environ 2 jr.). Ensuite, on note deux courtes périodes de dysfonctionnement de l’antenne 2 survenues à la suite d’une mise en défaut du lecteur/enregistreur en septembre 2018 et d’une petite crue en mai 2019.

La veille quotidienne du dispositif par le transfert des données à distance a permis d’intervenir rapidement dès que les conditions hydrologiques étaient favorables pour rétablir le fonctionnement du dispositif et minimiser les risques de perte de données.

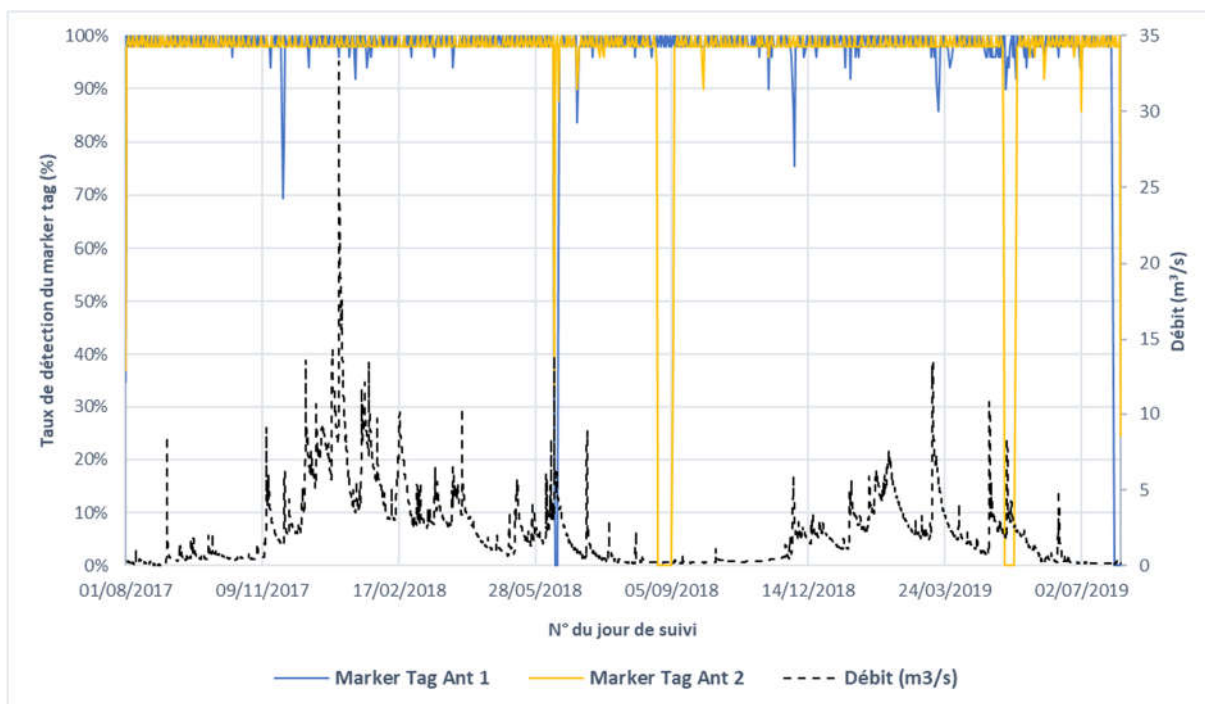


Figure 10 : Taux de détection des marker tag estimé pour les deux antennes du système fixe. La durée du suivi est de 730 jours. Le débit moyen journalier est aussi représenté.

3.2.2 Efficacité des antennes fixes

En considérant cette fois-ci la détection des poissons marqués au cours du suivi (165 au total, ayant franchi tout ou partie du rideau d’antenne) et en appliquant la formule de Zydlewski et

al. (cf. 2.5.2), nous avons pu estimer la probabilité de détection (aussi appelée efficacité Eff) des poissons marqués par le dispositif pendant toute la période de l'étude.

Le détail de calcul de cette probabilité, estimée pour chacune des antennes, est précisé ci-après :

$$\text{Eff}_{\text{ANT1}} = (165) \times (2+165)^{-1} = 0.988, \text{ soit une efficacité de } 98.8\%$$

$$\text{Eff}_{\text{ANT2}} = (165) \times (4+165)^{-1} = 0.976, \text{ soit une efficacité de } 97.6\%$$

On constate que les efficacités de détection sont très élevées, mais non maximales. Ceci est expliqué par le fait que tous les poissons marqués n'ont pas été détectés à chaque fois par les deux antennes lors de leur passage. Ainsi, 2 poissons ont été détectés par l'antenne 2 sans être détectés par l'antenne 1 (transpondeurs de 23 mm).

De même, 4 poissons marqués ont été détectés par l'antenne 1, sans avoir ensuite été détectés par l'antenne 2 (transpondeurs de 23 mm). Dans ce cas, cette différence peut s'expliquer, soit par une non-détection par l'antenne 2, soit par le fait que certains poissons n'ont pas franchi l'antenne 2 après avoir franchi l'antenne 1. Pour rappel, 25m les séparent et il est possible qu'un poisson se soit arrêté au niveau de l'antenne 1 après le franchissement de la buse.

L'efficacité combinée (Eff_{COMB}) qui en résulte est calculée ci-après :

$$\text{Eff}_{\text{COMB}} = 1 - ((1 - 0.988) \times (1 - 0.976)) = 0.999, \text{ soit une efficacité combinée de } 99.9\%$$

Une efficacité combinée de 99.9% signifie que le risque qu'un poisson marqué passe sur le dispositif à double antenne sans être détecté par au moins une des deux antennes est **très faible, pour ne pas dire nul**. Ceci est d'ailleurs confirmé par le fait que **tous les transpondeurs (n=36) détectés en amont des antennes lors des suivis mobiles ont été détectés par au moins une des antennes fixes**.

Grâce à un fonctionnement quasi permanent (724 jours sur 730) et à une efficacité de détection de quasi-100% du dispositif à double antenne, les données collectées peuvent être considérées comme exhaustives et permettent d'assurer un traitement valable pour répondre à la question du franchissement de la buse.

4. RÉSULTATS DU FRANCHISSEMENT DE LA BUSE PAR LES POISSONS

Dans ce chapitre, seules les données issues du système de suivi fixe ont été utilisées, puisque tous les poissons détectés en amont de la buse lors des suivis mobiles l'ont aussi été par les antennes fixes.

4.1 Synthèse des principaux résultats à retenir

Les chiffres clefs importants à retenir sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5 : Principaux résultats concernant le franchissement de la buse par les poissons marqués.

	TOTAL	2017	2018
Quantités marquées :	Total	815	435
	Capturés en aval	716	373
	Transférés (amont)	99	62
Quantités de TRF ayant franchi la buse :	Total	165	95
	Capturés en aval	91	47
	Transférés (amont)	74	47
% de TRF ayant franchi la buse :	Total	20,3%	21,70%
	Capturés en aval	12,7%	12,60%
	Transférés (amont)	74,7%	75,80%

4.2 Évolution des détections au cours du temps

Au cours de la totalité du suivi (730 jours), près de 15 millions de détections ont été enregistrées par les deux antennes, chaque poisson ayant été détecté plusieurs dizaines voire centaines de fois quotidiennement. En moyenne 4 poissons ont été détectés par jour. Certains individus sont restés plusieurs jours voir semaines à proximité des antennes fixes. D'autres individus, au contraire, ont franchi les antennes rapidement et n'ont plus été détectés par la suite.

La Figure 11 présente le nombre de poissons différents enregistrés chaque jour du suivi (en haut). On constate que les détections ont fortement augmenté en nombre à la suite de la seconde campagne de marquage, à savoir mi-juillet 2018.

La Figure 11 présente le nombre de nouveaux poissons détectés par le système fixe chaque jour. La somme des détections est égale à 165, ce qui représente le nombre total de poissons marqués ayant franchi le système d'antennes fixes sur la période d'étude. La période de franchissement est similaire pour les deux années et s'étale entre juillet et mi-novembre. La majorité des franchissements (80%) se concentre sur les mois d'octobre et novembre. Cependant, les franchissements sont assez rares au cours de l'hiver et du printemps.

On remarque aussi que la moitié des poissons qui ont franchi la buse (~50%), sont passés avant la seconde campagne de marquage (principalement avant la fin novembre 2017).

Enfin, les poissons ayant franchi la buse après la campagne de marquage 2018 ont majoritairement (83%) été marqués lors de cette seconde campagne (Figure 12). En effet, seulement 13 poissons ayant franchi l'obstacle lors de cette période sont issus de la première campagne de marquage, soit 17% (13/83) des poissons détectés.

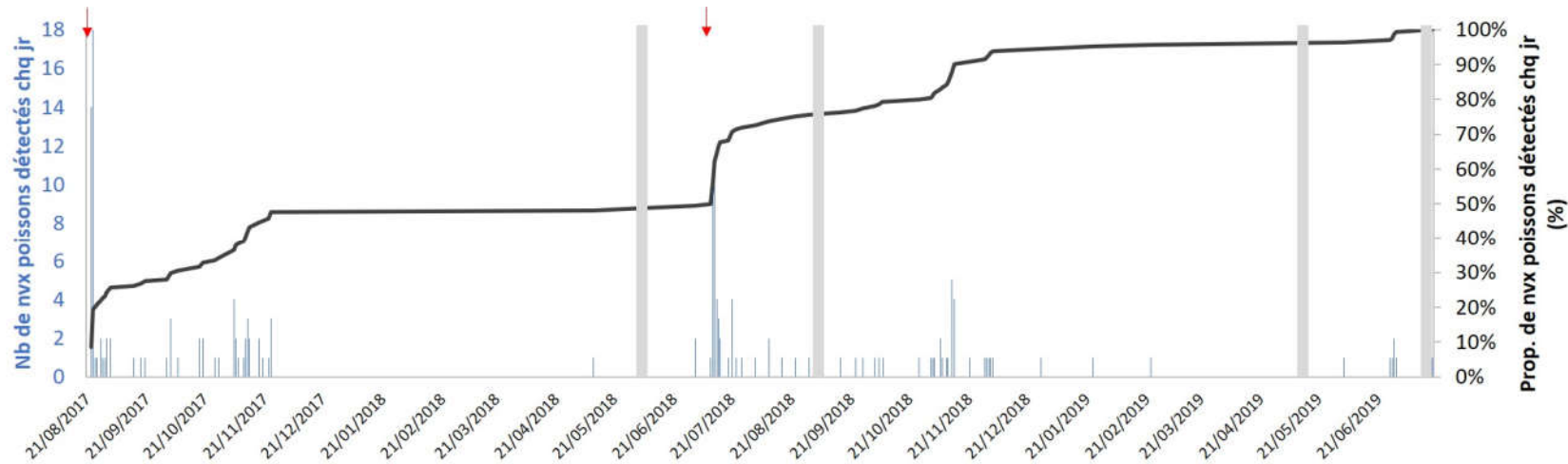


Figure 11 : Effectif de nouveaux poissons détectés par jour (histogramme bleu) et proportion cumulée associée (courbe noire). Les flèches rouges indiquent les dates de marquage. Les lignes grises indiquent les périodes de dysfonctionnement du système fixe.

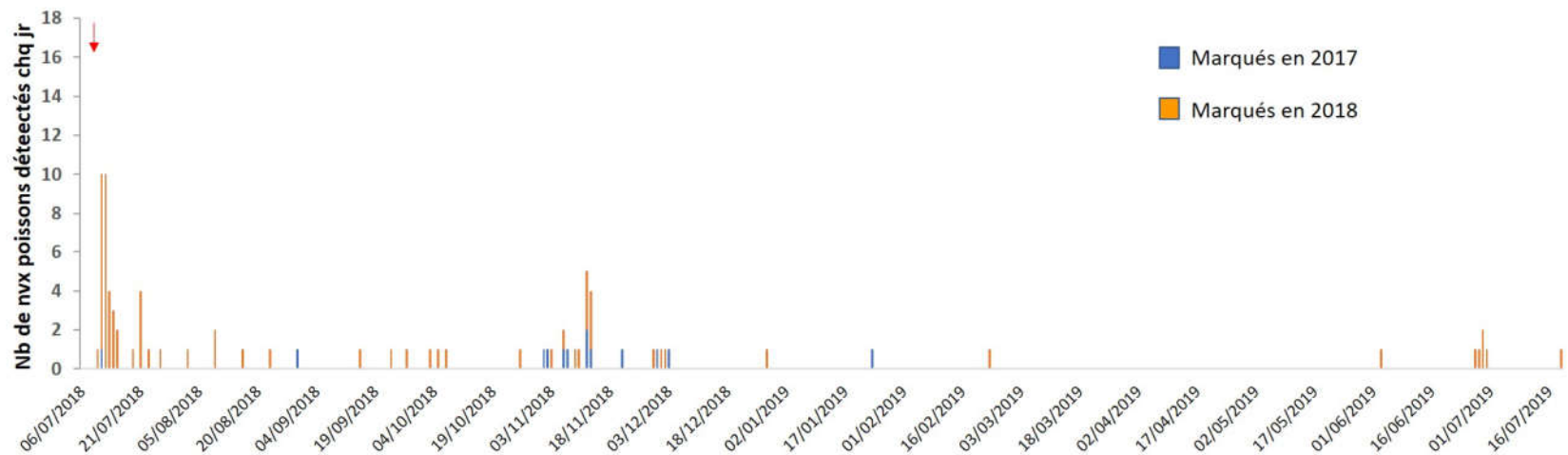


Figure 12 : Nombre de nouveaux poissons détectés chaque jour exprimé en fonction de leur année de marquage (2017 et 2018). La chronique commence la veille de la seconde campagne de marquage, soit le 06/07/2018. Les flèches rouges indiquent les dates de marquage.

4.3 Caractérisation des truites ayant franchi la buse

La distribution des tailles des poissons ayant franchi la buse est présentée dans la Figure 13, accompagnée de la distribution des poissons provenant de l'amont de l'aménagement, ainsi que de la distribution des 815 poissons marqués.

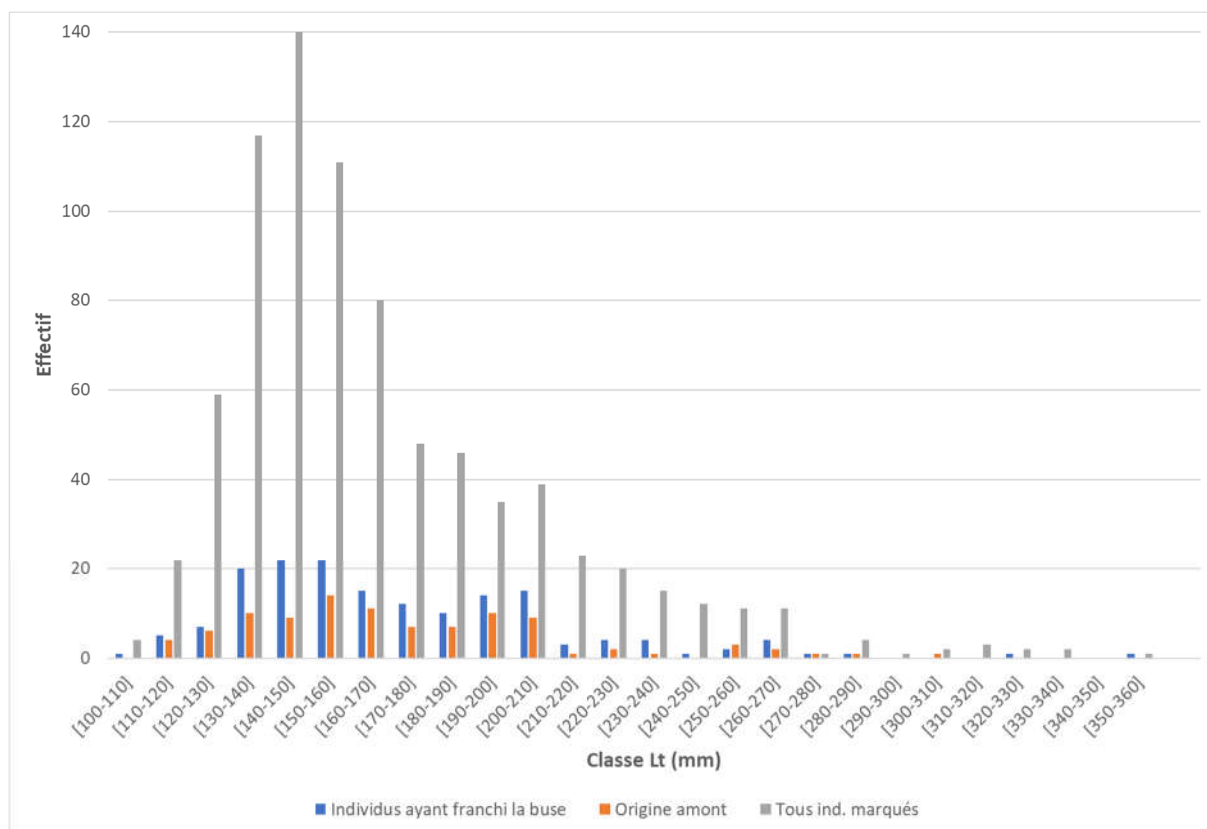


Figure 13 : Distribution des tailles des truites (Lt en mm) ayant franchi la buse et comparaison avec la distribution des poissons provenant de l'amont de la buse et la totalité des poissons marqués.

Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les trois distributions (test *U de Mann-Whitney*, $p\text{-value} > 0.05$). Ainsi, pendant la période suivie, la buse a été franchissable pour toutes les classes de tailles des truites échantillonnées.

4.3.1 Influence de la translocation sur le franchissement

La Figure 14 présente le nombre de poissons différents ayant franchi la buse en fonction de leur origine (amont ou aval de la buse) au moment de leur marquage. Le Tableau 6 présente la synthèse des effectifs de truites ayant franchi la buse en fonction de l'année de marquage et de leur origine.

Tableau 6 : Synthèse des effectifs (et proportions associées) de truites ayant franchi la buse en fonction de leur année de marquage et de leur origine (n total=165).

	Années de marquage		Origine	
	2017	2018	Amont	Aval
Effectif	95	70	74	91
Proportions (%)	58%	42%	45%	55%

Les points principaux suivants sont à souligner :

- On constate que la majorité des truites ayant franchi la buse ont été marquées en 2017 (58%) et sont principalement issues de l'aval de la buse (55%, Tableau 6).
- Pour les deux campagnes de suivi, la majorité des franchissements a été enregistrée durant les premiers jours de suivi (moins d'une semaine) ;
- Parmi les poissons ayant franchi en premier la buse, la grande majorité (99% en 2017 et 53% en 2018) correspond à des poissons transférés. On constate bien un effet « translocation » sur la rapidité de franchissement.
- La majorité des poissons issus de l'amont est passée lors de la première semaine qui a suivi le marquage, ce sont en effet 55 des 99 poissons transloqués qui ont passé la buse durant cette semaine.
- La période « naturelle » de migration (estimée en ne considérant que les poissons issus de l'aval de la buse au moment du marquage) semble démarrer au milieu de l'été (dès courant juillet) et se finir vers la fin novembre.



Figure 14 : Nombre de nouveaux poissons marqués détectés chaque jour par les antennes fixes, en fonction de leur origine (amont en rouge ou aval en bleu). En haut, les poissons détectés à la suite de la première campagne de marquage en août 2017. En bas, les nouveaux poissons détectés à la suite de la seconde campagne de marquage en juillet 2018. Les proportions cumulées de nouveaux poissons ayant franchi la buse chaque jour sont représentées : elles sont présentées en fonction de l'origine des truites ; la totalité de la chronique n'étant pas représentée, la proportion cumulée présentée n'atteint pas 100% (notamment pour les truites d'origine aval). Les flèches rouges indiquent les dates de marquage.

4.3.2 Influence de la distance à la buse

La distance entre la buse et le lieu de relâcher des poissons marqués peut influencer la probabilité de franchissement de la buse. Les taux de détection par les antennes fixes ont été calculés par tronçon puis comparés (Figure 15). Deux calculs de proportion sont proposés : la proportion de poissons ayant franchi la buse en fonction de leur tronçon de relâcher (en italique) et la proportion de poissons ayant franchi la buse en fonction de leur tronçon d'origine rapportée au nombre total de poissons détectés en amont de l'aménagement (en italique gras). Il ressort les éléments suivants :

- Malgré la grande quantité de poissons relâchés dans le tronçon situé le plus en aval (près de 18% des poissons marqués relâchés dans le tronçon 7), une faible proportion de ces individus a franchi la buse (~4%, 7/148), ce qui semble indiquer un effet de la distance à la buse sur la probabilité de franchissement.
- Pour les tronçons intermédiaires (de 8 à 15), l'effet distance est moins net puisque, quel que soit le tronçon d'origine considéré, peu de poissons ont franchi la buse (*au total 59 poissons sur les 477 ayant été marqués sur ce linéaire*).
- La majorité des poissons ayant franchi la buse est issue du tronçon 17 localisé en pied de buse. En effet, *sur les 190 poissons relâchés dans ce tronçon, 99 ont franchi la buse (soit 60%), dont 74 provenant de l'amont (translocations)*. Cependant, si l'on considère uniquement les poissons non transloqués (n=91), il ne semble pas que ces derniers aient davantage franchi l'aménagement, puisqu'uniquement **25/91** individus ont franchi la buse (**soit 27%**). Ce résultat est très proche de celui observé pour les poissons provenant du tronçon 15 (**25%**).

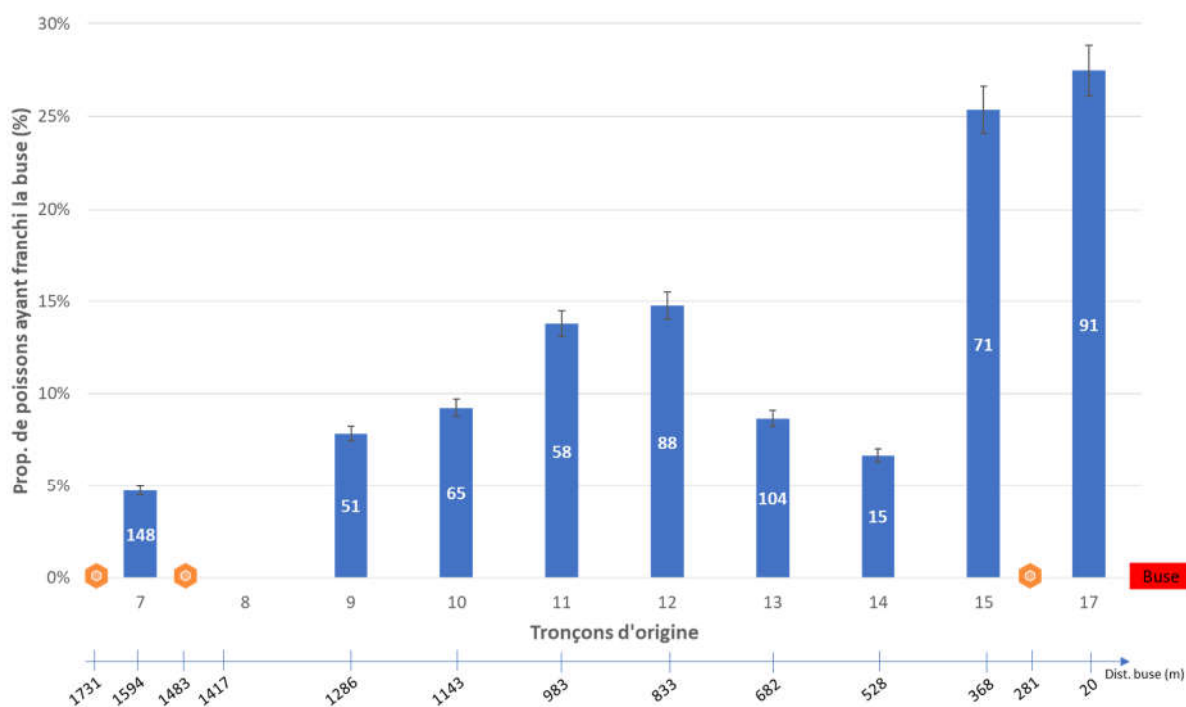


Figure 15 : Proportion de poissons marqués et relâchés en aval de la buse, ayant franchi la buse (histogrammes bleus avec intervalle de confiance de 5%), en fonction du tronçon d'origine. Les nombres indiqués sur les histogrammes indiquent les effectifs de poissons relâchés par tronçon (uniquement d'origine aval). Les distances à la buse (en m) de chaque point d'intérêt sont rappelées (obstacles et milieu des tronçons).

4.3.3 Influence des facteurs abiotiques

Dans ce chapitre, l'influence de certains facteurs abiotiques (débit et température) sur le franchissement de la buse par les poissons est analysée. Comme un fort effet « translocation » a été mis en évidence dans le chapitre 4.3.1, nous avons retiré les poissons transloqués de l'analyse, de manière à ne considérer que les migrations naturelles. Le jeu de données utilisé ne concerne donc que les 91 poissons ayant franchi la buse, mais issus de l'aval de l'aménagement avant leur marquage.

La Figure 16 synthétise le nombre de poissons différents ayant franchi la buse en rapport avec les gammes de débits utilisées pour le dimensionnement théorique de l'ouvrage de franchissement. Il est particulièrement intéressant de pouvoir confronter les résultats des franchissements réels obtenus par marquage RFID avec les débits de dimensionnements hydrauliques de l'ouvrage de franchissement.

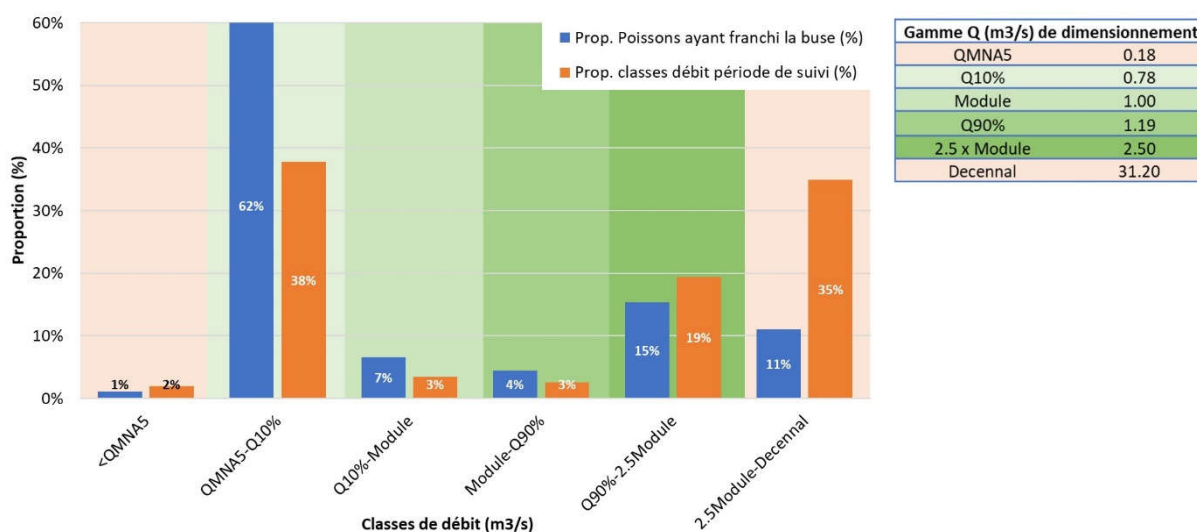


Figure 16 : Proportions de poissons ayant franchis la buse en fonction des plages de débits utilisées pour caler le dimensionnement hydraulique du dispositif de franchissement. Effectif total=91.

Globalement on observe des franchissements dans toutes les plages de débits comprises dans la gamme de dimensionnement hydraulique c'est-à-dire entre le QMNA5 et 2,5 fois le module.

La grande majorité des poissons (62%) a franchi la buse à faibles débits dans la plage de débits [QMNA5-Q10%] c'est-à-dire entre 0,18 et 0,78m³/s.

Il est également intéressant de noter que 11% des poissons ont franchi la buse à des débits supérieurs à la gamme de dimensionnement.

La distribution des tailles de truites dans les différentes plages de débits ne montre pas de sélectivité significative des débits sur la taille des poissons qui ont franchi la buse (Figure 17). Les deux plus petits individus (<120mm) qui ont franchis la buse l'ont fait à des débits inférieurs à 0,5m³/s.

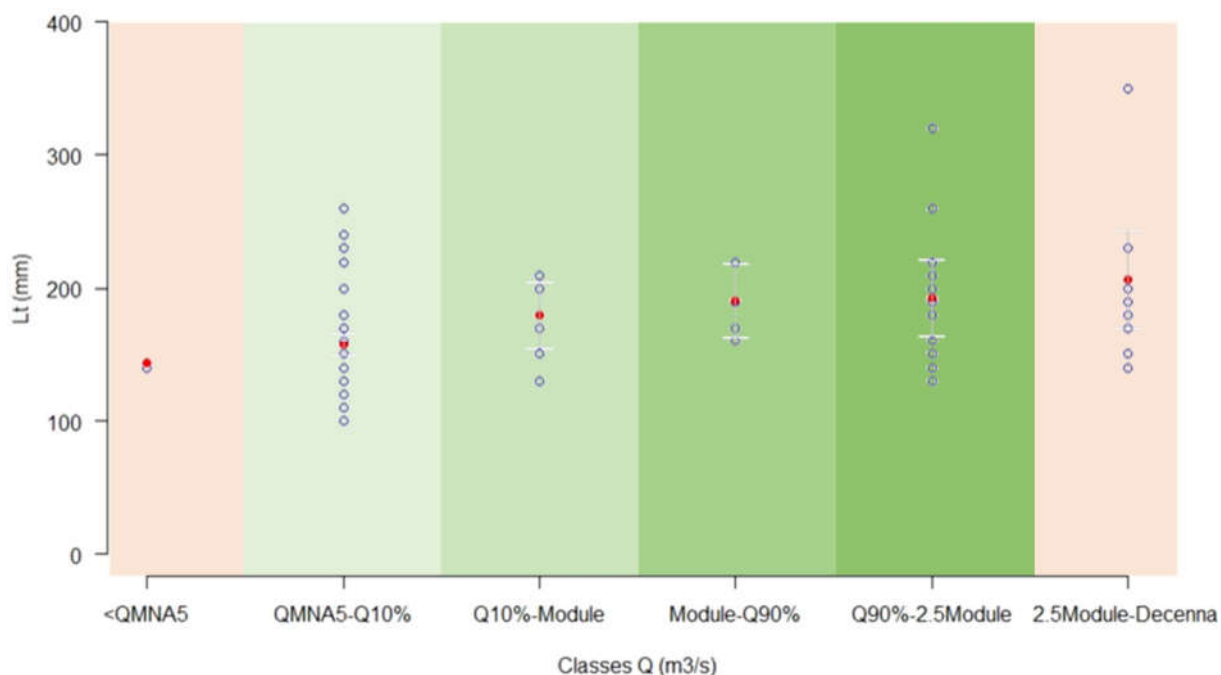


Figure 17 : Relation entre le débit moyen journalier (en m³/s) calculé au moment du franchissement de la buse par les poissons issus de l'aval de l'aménagement, en fonction de leur taille (Lt en mm).

La Figure 18 présente en parallèle l'évolution du nombre de nouveaux poissons marqués détectés chaque jour par les antennes fixes avec la chronique de débit et de température durant toute la période de suivi.

On ne remarque pas d'effet « déclencheur » des débits sur le franchissement de la buse.

En ce qui concerne la température, aucune influence n'a été observée pour des températures >5°C et le faible nombre de poissons ayant franchi la buse à <5°C corrobore le fait que les franchissements sont peu fréquents durant l'hiver et le début du printemps. En effet, les deux distributions de proportion sont significativement différentes (test du X², X-squared = 30.654, df = 3, p-value = 1.006e-06), ce qui semble valider le fait que les températures basses ne favorisent pas la mobilité des poissons.

Cependant, on observe que ces températures basses sont accompagnées de débits plutôt élevés (notamment en 2018), qui semblent jouer un rôle prépondérant sur le franchissement. L'influence de la thermie sur le franchissement de la buse peut donc être atténuée par l'hydrologie durant notre étude.

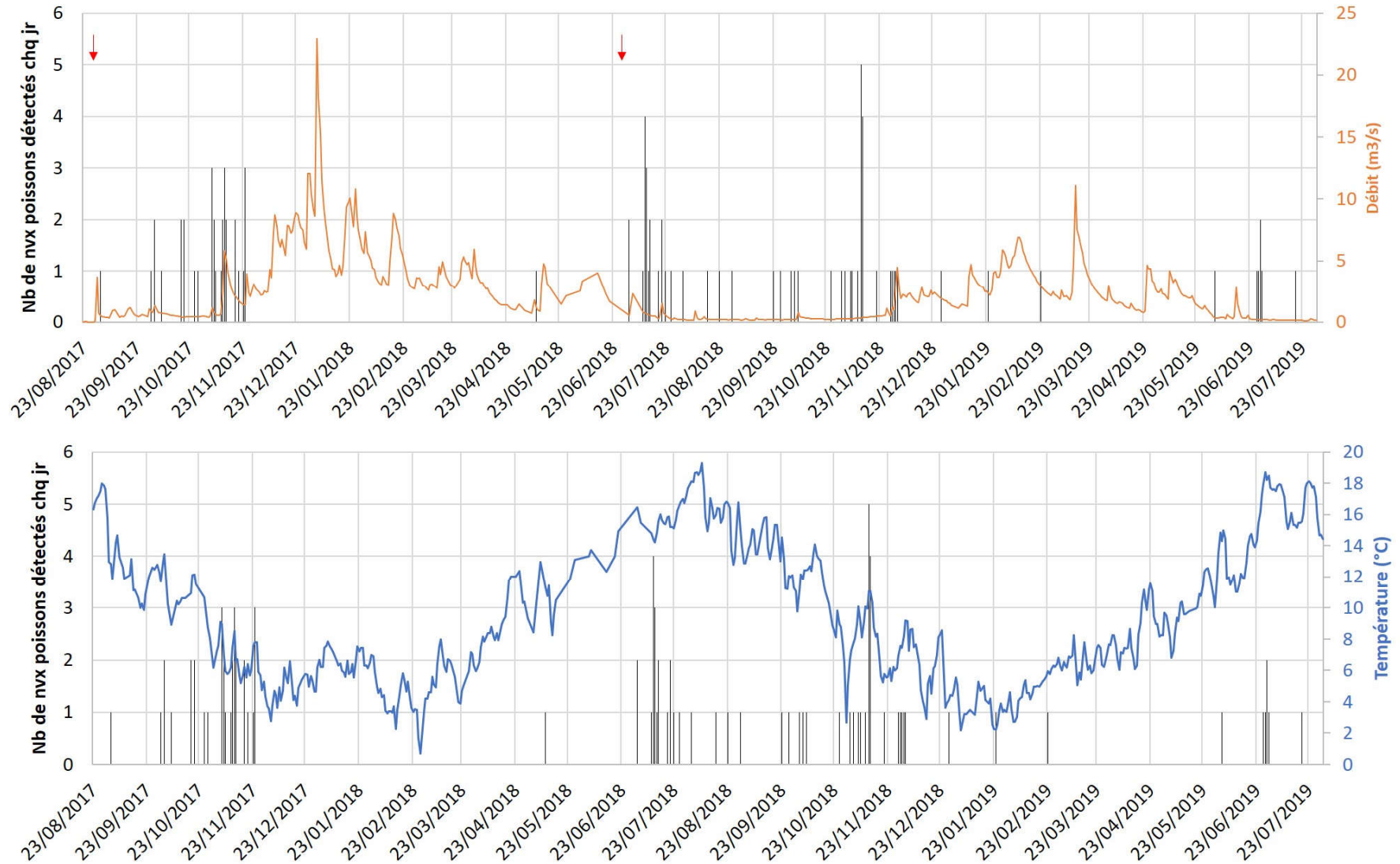


Figure 18 : Nombre de nouveaux poissons détectés chaque jour, uniquement ceux d'origine aval de la buse, en fonction du débit moyen journalier (en m³/s en haut) et de la température moyenne journalière (en °C, en bas). Les flèches rouges indiquent les dates de marquage.

En résumé, les principaux résultats obtenus à partir du système d'antennes fixes sont les suivants :

La buse OH448 est franchissable par les truites de taille supérieure à 100 mm, quelle que soit leur taille. La période principale de franchissement s'échelonne de l'été jusqu'à la fin de l'automne. Très peu de franchissements ont été observés durant l'hiver et le printemps.

La plupart des poissons capturés en amont de la buse puis relâchés en aval après marquage (« translocations ») ont franchi la buse (75% de l'effectif marqué). Les franchissements ont été enregistrés principalement (près de 47% des franchissements) durant la première semaine suivant le marquage, tout particulièrement en 2017. À noter cependant que certains individus transloqués ont franchi la buse bien plus tard dans la saison.

Concernant les individus capturés et marqués en aval de la buse (non transloqués), le taux de franchissement observé est de 13%. On constate un effet distance à la buse, avec un franchissement majoritaire des truites ayant été relâchées en aval direct de l'ouvrage (27% pour le tronçon 17 et 25% pour le tronçon 15), par rapport aux truites marquées plus en aval (entre 9 et 13% pour les poissons relâchés environ 1 km en aval de la buse). Il est aussi intéressant de souligner que des individus relâchés près de 1.5 km en aval de la buse ont tout de même réussi à franchir l'aménagement (phénomène rare).

La majorité (58%) des poissons ayant franchi la buse est issue de la première campagne de marquage, en 2017. La différence d'effectif de truites marquées entre les deux campagnes peut expliquer ce résultat.

Enfin, on constate que le débit a une influence sur le franchissement de la buse puisque la majorité des franchissements a lieu à des débits $< 1 \text{ m}^3/\text{s}$. L'aménagement réalisé semble fonctionnel et permet le franchissement des poissons dans la gamme de débits utilisée pour son dimensionnement et même au-delà. Les résultats ne mettent pas en évidence de seuil de débit limitant le franchissement, des franchissements ayant été comptabilisés à des débits $> 5 \text{ m}^3/\text{s}$. Aucune influence claire de la température n'a été notée. Il est toutefois délicat d'isoler les effets respectifs des facteurs débit et température, les périodes de fort débit correspondant aux périodes de températures les plus basses (hiver-début de printemps).

5. RÉSULTATS ISSUS DES PROSPECTIONS MOBILES

5.1 Estimation du taux de détection lors des suivis mobiles

Au cours des 7 campagnes de suivis mobiles, nous avons pu estimer un taux instantané de détection qui prend en compte l'effectif de truites marquées au moment du suivi. Notamment, comme indiqué dans la Figure 19, ce nombre a augmenté à la suite de la seconde campagne de marquage, passant de 435 à 815 individus.

Il n'a pas été possible d'installer un dispositif de détection fixe en limite aval du secteur d'étude pour connaître les poissons sortis du linéaire prospecté par dévalaison. Le calcul réalisé ne donne pas l'efficacité des campagnes de prospection, mais informe sur un taux de détection, qu'il est possible de comparer entre campagnes successives. Ce taux est en réalité biaisé, car il considère la présence sur le linéaire prospecté d'un nombre fixe de poissons marqués au cours du temps, ce qui est erroné puisque qu'un nombre important, mais inconnu de poissons est sorti du secteur d'étude par dévalaison, voire plus ponctuellement par montaison.

Certains transpondeurs ont pu être perdus suite à des mortalités de poissons marqués ou des rejets de marques (possibles en période de reproduction notamment). Pour cette raison, nous parlerons d'un taux de détection des transpondeurs et non d'une efficacité de prospection (Figure 19).

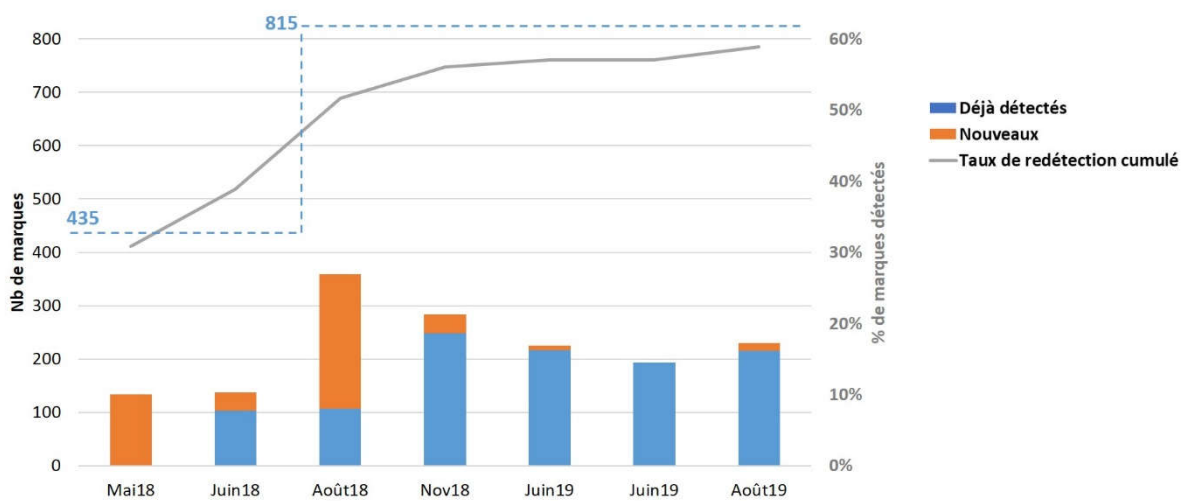


Figure 19 : Estimation des taux de détections lors des 7 campagnes de suivi mobile et taux de détections cumulé (courbe grise). Le nombre de poissons marqués utilisé comme référence pour le calcul des proportions est représenté en pointillés.

Le taux de détections cumulées augmente au cours des différents suivis mobiles, passant de 31% le 2 mai 2018 à 59% le 1^{er} août 2019. Au total, 480/815 transpondeurs ont été détectés au cours des 7 campagnes de suivi mobile.

On observe une augmentation non négligeable de ce taux entre le second et le troisième suivi (+13%) qui s'explique par l'ajout de nouveaux transpondeurs (seconde campagne de marquage), mais aussi par la proximité temporelle du 3^e suivi après la seconde campagne de marquage. On constate notamment que 232 des 380 transpondeurs utilisés lors du marquage 2 (en 2018) ont été détectés lors du suivi #3, soit un taux de redétections immédiat de 61%. En outre, le débit a peu augmenté entre ces deux dates, ce qui a favorisé le nombre de transpondeurs détectables dans la zone de suivi.

Les suivis mobiles ont permis de détecter au cumul près de 60% des transpondeurs utilisés pour marquer les poissons.

Les taux de détections varient entre 0 et 31% selon les prospections. L'efficacité réelle des prospections est difficile à évaluer, elle a pu être calculé uniquement pour la prospection n°3 avec une efficacité de 61%. Cette valeur est conforme à la littérature scientifique, qui donne des efficacités comprises entre 48 et 74% sur des cours d'eau de moins de 10 mètres de large (Richard 2014; Vatland et Caudron 2015).

5.2 Analyses de la mobilité des poissons marqués en aval de la buse

Le principal objectif des prospections mobiles était de tester l'hypothèse d'un effet bloquant de la buse sur la migration piscicole. La caractérisation des déplacements des individus marqués sur le linéaire aval obtenue grâce aux sept prospections permet de rechercher une éventuelle accumulation de poissons migrants à proximité de la buse.

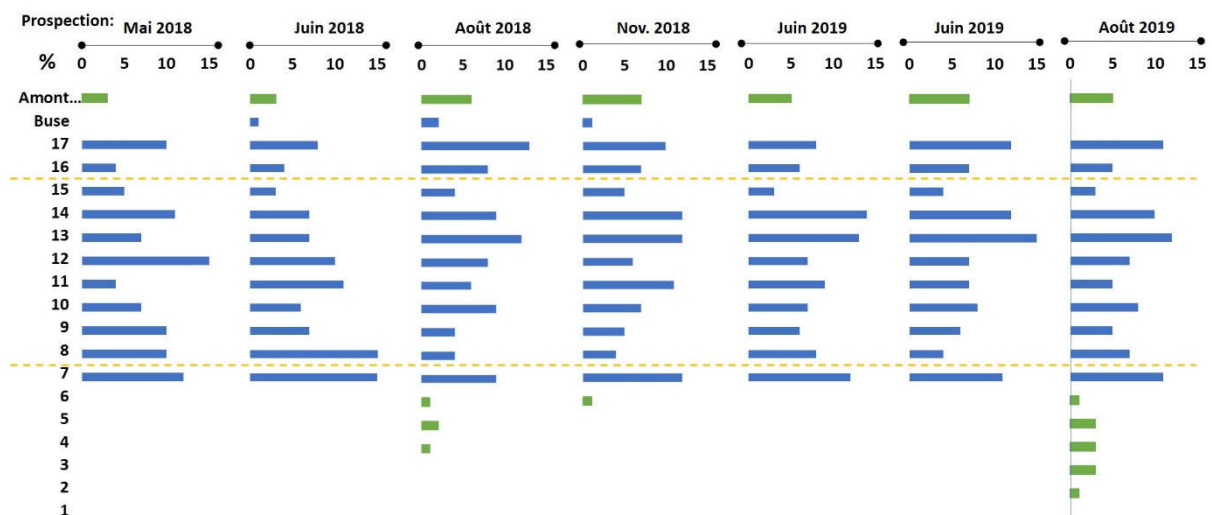


Figure 20 : Répartition en pourcentage des poissons détectés sur chaque tronçon au cours des sept prospections mobiles. En bleu : tronçons situés sur le secteur d'étude initial (zone de marquage), en vert : tronçons situés hors de la zone de marquage. Les lignes pointillées représentent la localisation des deux autres ouvrages transversaux présents sur le linéaire d'étude.

Les résultats ne mettent pas en évidence de déplacements importants d'individus vers la buse au cours des différentes périodes (Figure 20). La répartition des poissons détectés par tronçon est assez peu variable au cours des deux ans de suivi et correspond globalement à la répartition initiale des poissons marqués. Les deux ouvrages transversaux présents sur le linéaire prospecté ne semblent pas perturber la migration des poissons. De même, aucune accumulation de poissons n'a été observée en aval de la buse sur le tronçon 17 (Figure 22).

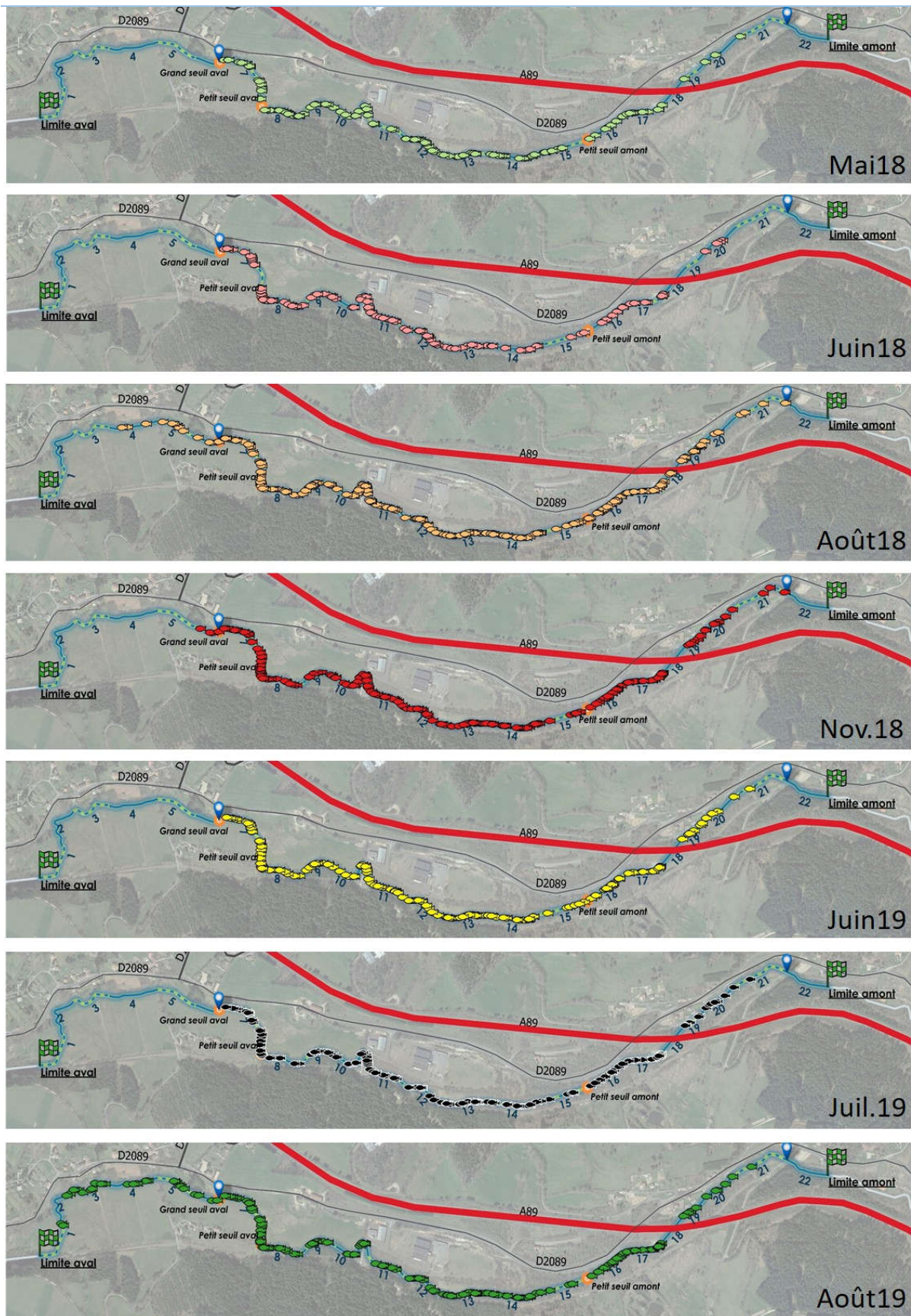


Figure 21 : Géolocalisation des détections individuelles obtenues au cours des sept prospections mobiles.

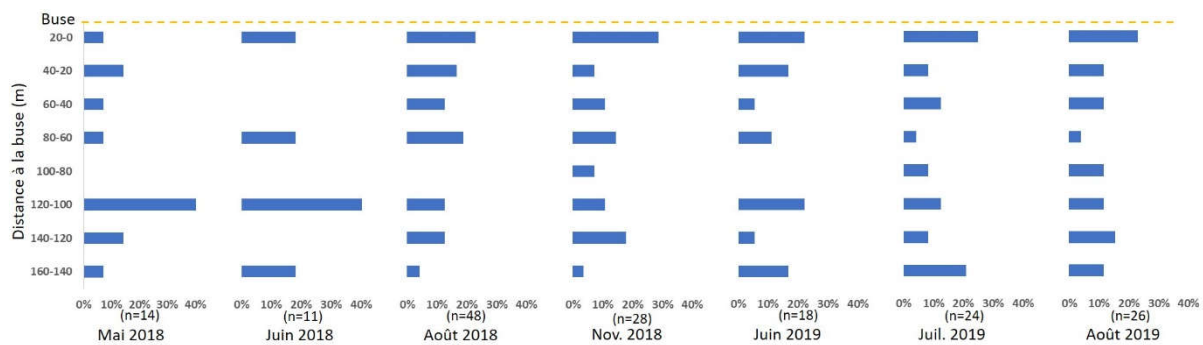


Figure 22 : Répartition par classes de distance des poissons détectés sur le tronçon 17 en aval immédiat de la buse au cours des sept prospections mobiles.

Au final sur la totalité des 815 truites marquées présent en aval de la buse, 165 ont franchi la buse, 450 ont été détectées sur les tronçons en aval et 200 n’ont jamais été redétectées.

La grande majorité des truites marquées a été détectée en aval de buse sur le linéaire de marquage montrant peu de migration. La difficulté est de savoir si les marques détectées en aval correspondent réellement à des poissons encore vivants ou s’il s’agit de marques inertes c’est-à-dire soit perdues par les poissons (au cours de la reproduction par exemple) soit libérées dans le milieu suite à la mortalité naturelle des individus (Figure 23). La majorité des marques détectées montre très peu de mouvement au cours de la période d’étude : cette question est donc importante afin d’évaluer si cette sédentarité apparente correspond bien à des truites vivantes.

	TOTAL	%	
Total marqué	815	-	
Total franchi la buse	165	20,3%	
Redétecté en aval	450	55,2%	→ Quel statut ? - poissons vivants → si: - recapturés vivants - marques perdues - déplacement vers l’amont - poissons morts
Jamais redétecté	200	24,5%	→ Quel statut ? - dévalaison - non détection

Figure 23 : Effectifs clés à retenir concernant la détection des poissons sur la zone d’étude et réflexion concernant leur statut.

Pour approcher cette question, nous avons analysé les distances parcourues des poissons dont le statut vivant est certain : les truites marquées en 2018 et recapturées lors des pêches de marquages en 2019, et les marques qui ont effectuées des déplacements vers l’amont.

Finalement, les résultats mettent en évidence une tendance nette à la sédentarité pour la majorité des truites marquées et redétectées.

En effet, l’amplitude des déplacements réalisés par les poissons dont on est certain du statut vivant est faible, ils restent majoritairement sur linéaire d’environ 200 mètres de rivières.

L'amplitude de déplacement de toutes les marques (dont on ne sait pas s'ils sont des poissons vivants ou des tags perdus) est identique à celle des poissons vivants (Figure 24).

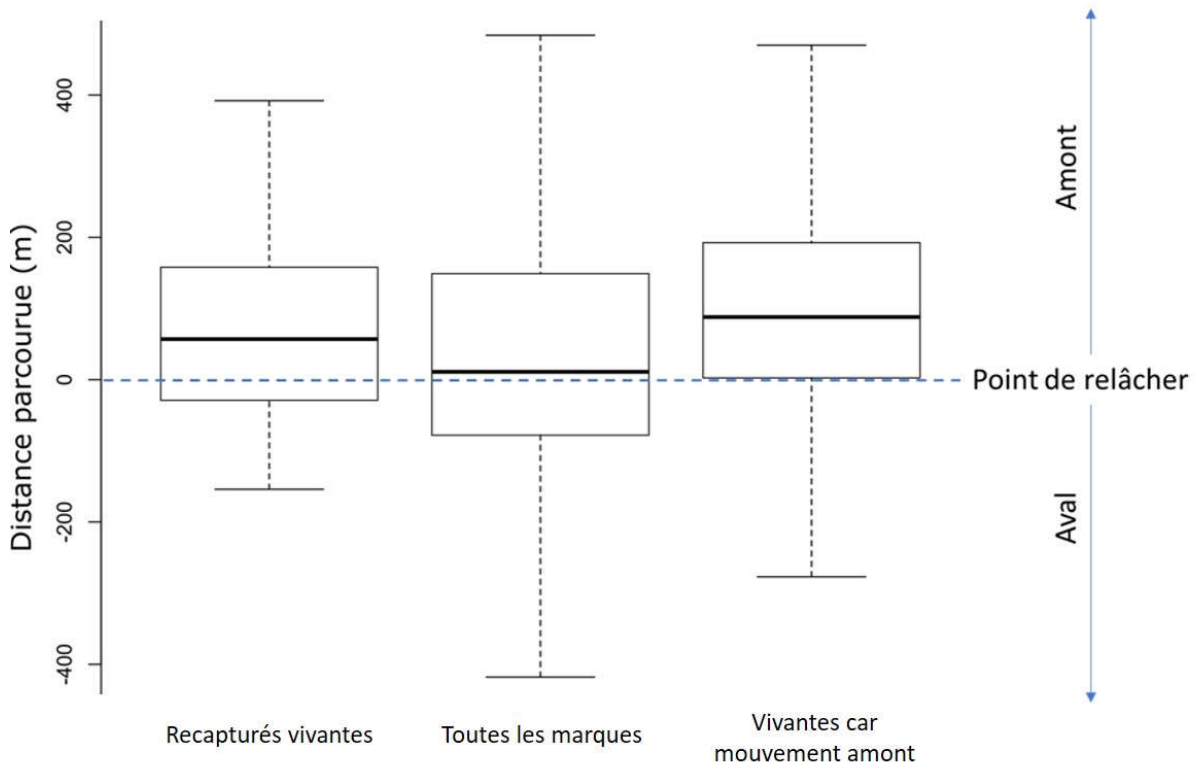


Figure 24 : Box-plot présentant les distances parcourues entre chaque nouvelle détection pour les truites recapturées vivantes, et les poissons ayant effectués des déplacements vers l'amont et toutes les marques réunies.

Aucun effet « barrière » de la buse n'a été observé, ce qui suggère que l'aménagement entraîne peu de blocage de poissons lors de leur migration de montaison, en tout cas pour les individus >100mm qui ont été suivis. Ce constat semble être le même pour les deux petits seuils présents dans le linéaire d'étude.

Les résultats tendent à montrer un phénomène majoritaire de sédentarité des truites marquées au cours de la période suivie avec des déplacements de l'ordre de 200 mètres.

6. CONCLUSION ET ENSEIGNEMENTS

Pour rappel, les contraintes du site d'étude n'ont pas permis de mettre en œuvre un design de suivi optimal intégrant un dispositif fixe à l'aval immédiat de la buse pour identifier les individus essayant de rentrer dans la buse et un autre en limite aval du linéaire de marquage pour connaître les individus marqués sortis du secteur d'étude.

Cependant, le protocole mis en place, couplant un dispositif de détection fixe localisé en amont immédiat de la buse et sept campagnes de prospection mobile, a permis de fournir des résultats très satisfaisants concernant la franchissabilité de la buse. D'une part, le dispositif fixe double antenne a montré une efficacité de quasi 100% durant les deux années de suivis, et a permis de détecter la totalité des truites marquées qui ont franchi la buse. Ensuite, les prospections mobiles répétées ont permis à la fois d'évaluer un éventuel effet bloquant de la buse et des deux autres obstacles présents sur le linéaire étudié, mais aussi de fournir quelques éléments sur la dispersion des truites au sein du secteur d'étude.

La période de suivi sur 2 années complètes apparaît satisfaisante, car elle a permis de suivre deux périodes de migration pré reproduction dans des conditions hydrologiques très variées. Les résultats confirment la nécessité d'avoir recours à une campagne de marquage annuelle de plusieurs centaines d'individus pour assurer une quantité de données suffisantes dans ce genre de suivi.

Le nombre de truites marquées, à savoir 815 au total, et la longueur du linéaire de marquage en aval de la buse de 1730 mètres, apparaissent suffisants pour prendre en compte la diversité des comportements migratoires sur un petit cours d'eau comme la Durolle.

La translocation d'individus capturés en amont vers l'aval de l'ouvrage étudié apparaît comme un plus dans un protocole d'évaluation de franchissement comme celui mis en œuvre sur la Durolle.

Concernant le franchissement de la buse, les points importants sont :

- **75 % des individus transloqués ont franchi la buse vers l'amont ;**
- **Les individus transférés représentent 45% de la totalité des 165 truites qui ont franchi la buse ;**
- **La grande majorité des individus transférés ont franchi la buse lors de la 1^{ère} semaine de suivi (99% en 2017 et 53% en 2018) ;**
- La période de franchissement majoritaire est observée autour **d'octobre/novembre.**

En conclusion, les principaux résultats fournis par cette étude sont :

- Le franchissement de la buse **semble effectif sur l'ensemble de la période suivie ;**
- **Aucune sélection de la buse sur la taille des poissons** n'a été observée ;
- Il n'a **pas été mis en évidence d'accumulation de poissons marqués au pied de la buse ni en aval des deux petits seuils** présents sur le linéaire étudié ;

- **L'aménagement réalisé permet le franchissement des truites** dans la gamme de débits utilisée pour son dimensionnement ;
- Le **franchissement s'est majoritairement déroulé à faible débit** $<1 \text{ m}^3/\text{s}$;
- La proportion de **truite migrante est faible**, environ 13% de la population en place en aval et **la majorité des truites montre un comportement plutôt sédentaire**.
- **Les truites relâchées en pied de buse ont parcouru de plus faibles distances que les poissons relâchés plus en aval**. Ces individus se sont rarement déplacés vers l'aval entre le moment de leur marquage et leur détection en amont de la buse.

7. RÉFÉRENCES

- Acolas, Marie-Laure, Jean-Marc Roussel, Jean Marc Lebel, et Jean-Luc Baglinière. 2007. « Laboratory experiment on survival, growth and tag retention following PIT injection into the body cavity of juvenile brown trout (*Salmo trutta*) ». *Fisheries Research* 86(2-3):280-84.
- Baras, E., L. Westerloppe, Charles Mélard, J-C Philippart, et V. Bénech. 1999. « Evaluation of implantation procedures for PIT-tagging juvenile Nile tilapia ». *North American Journal of Aquaculture* 61(3):246-51.
- Brown, R. S., S. J. Cooke, W. G. Anderson, et R. S. McKinley. 1999. « Evidence to challenge the “2% rule” for biotelemetry ». *North American Journal of Fisheries Management* 19(3):867-71.
- Elliott, JaM et JA Elliott. 2010. « Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change ». *Journal of fish biology* 77(8):1793-1817.
- Fiches cours d'eau SANDRE. 2010. « La Durolle [K29-0310] ».
- Jepsen, N., A. Koed, E. B. Thorstad, et E. Baras. 2002. « Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: How much have we learned? » *Hydrobiologia* 483:239-48.
- Keene, J. L., D. L. G. Noakes, R. D. Moccia, et C. G. Soto. 1998. « The efficacy of clove oil as an anaesthetic for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) ». *Aquaculture Research* 29(2):89-101.
- Richard, A. 2014. « Régulation densité-dépendance des juvéniles de truites *Salmo trutta* sous l'effet du rempoissonnement : implications pour la gestion. » Thèse de doctorat *Ecology, environment. Université de Grenoble*.
- Richard, Alexandre, Jane O'Rourke, Arnaud Caudron, et Franck Cattaneo. 2013. « Effects of passive integrated transponder tagging methods on survival, tag retention and growth of age-0 brown trout ». *Fisheries Research* 145:37-42.
- Vatland, Shane et Arnaud Caudron. 2015. « Movement and early survival of age-0 brown trout ». *Freshwater biology* 60(7):1252-62.
- Zydlewski, Gayle Barbin, Gregg Horton, Todd Dubreuil, Benjamin Letcher, Sean Casey, et Joseph Zydlewski. 2006. « Remote monitoring of fish in small streams: a unified approach using PIT tags ». *Fisheries* 31(10):492-502.