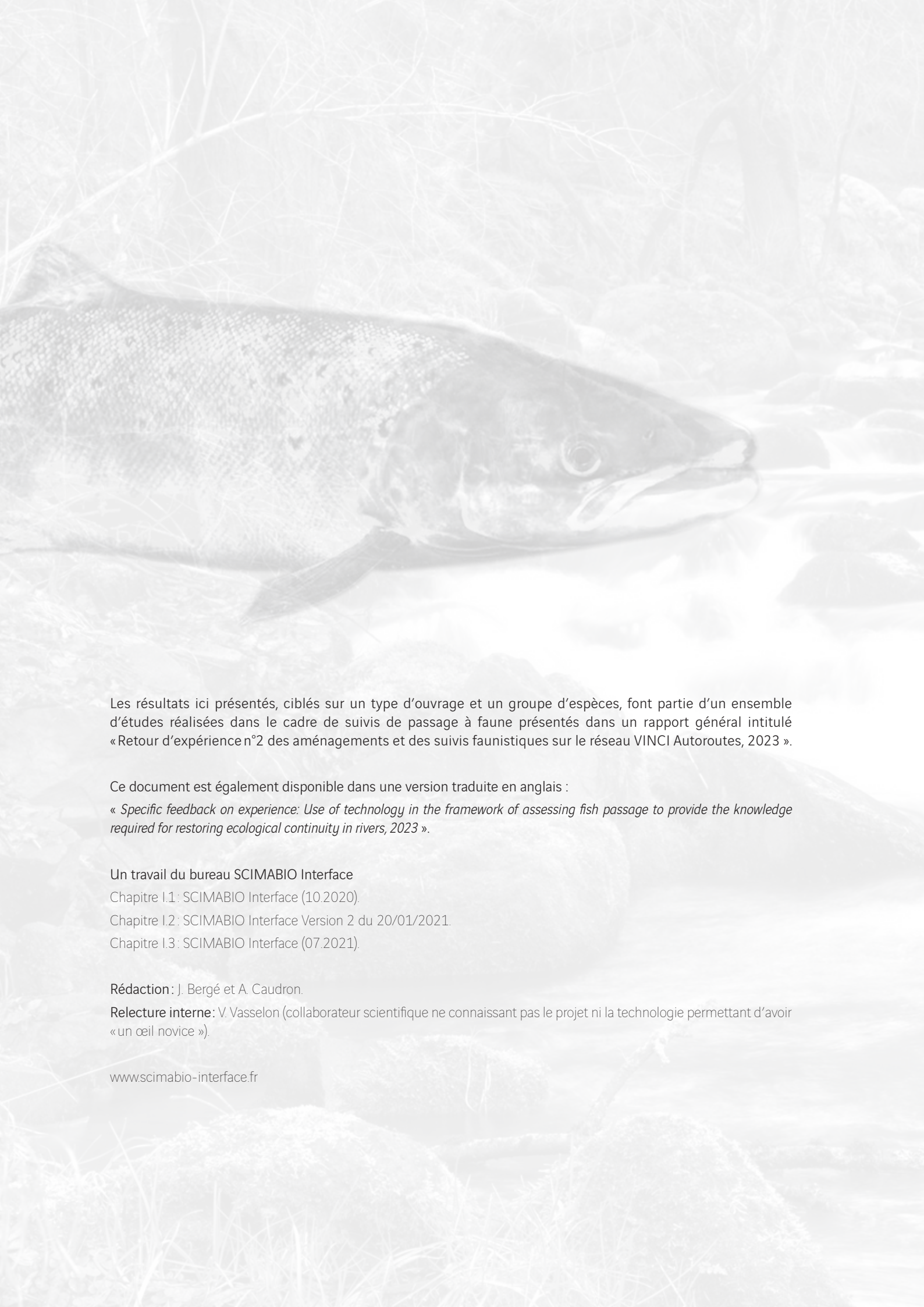




**R A P P O R T**  
Retour d'expérience  
spécifique : Emploi de  
la technologie dans le  
cadre de l'évaluation  
du franchissement  
piscicole pour l'apport de  
connaissances nécessaires  
à la restauration de la  
continuité écologique  
dans les cours d'eau



Les résultats ici présentés, ciblés sur un type d'ouvrage et un groupe d'espèces, font partie d'un ensemble d'études réalisées dans le cadre de suivis de passage à faune présentés dans un rapport général intitulé « Retour d'expérience n°2 des aménagements et des suivis faunistiques sur le réseau VINCI Autoroutes, 2023 ».

Ce document est également disponible dans une version traduite en anglais :

« *Specific feedback on experience: Use of technology in the framework of assessing fish passage to provide the knowledge required for restoring ecological continuity in rivers, 2023* ».

**Un travail du bureau SCIMABIO Interface**

Chapitre I.1 : SCIMABIO Interface (10.2020).

Chapitre I.2 : SCIMABIO Interface Version 2 du 20/01/2021.

Chapitre I.3 : SCIMABIO Interface (07.2021).

**Rédaction :** J. Bergé et A. Caudron.

**Relecture interne :** V. Vasselon (collaborateur scientifique ne connaissant pas le projet ni la technologie permettant d'avoir « un œil novice »).

[www.scimabio-interface.fr](http://www.scimabio-interface.fr)

## **I. SUIVIS PAR LA TECHNOLOGIE RFID - ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE DE LA BUSE OH448 DE L'A89 SUR LA DUROLLE (PUY-DE-DÔME,63) 5**

Le contexte de l'étude	5
Dispositif et stratégie de suivi	8
La truite ( <i>Salmo trutta L.</i> ), l'espèce cible	9
Principaux résultats	11
Enseignements sur le protocole déployé et l'emploi de la technologie RFID	13
Bibliographie citée	13

## **II. SUIVI PAR RADIODÉLÉMENTRIE - ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT DES AMÉNAGEMENTS DU SEUIL A89 SUR LA RIVIÈRE ALLIER PAR LE SAUMON ATLANTIQUE (PUY-DE-DÔME,63) 15**

Le contexte de l'étude	15
Le linéaire de l'étude	15
Un dispositif de capture et de manipulation adapté au saumon atlantique	17
Les saumons atlantiques marqués et suivis durant l'étude	19
Conditions environnementales de suivi	20
Un dispositif de suivi adapté à la zone d'étude et au questionnement général	21
Principaux résultats	25
Conclusions et réponses apportées par l'étude	27
Bibliographie citée	28

## **III. MÉTHODES APPLIQUÉES AUX SUIVIS DE RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE 31**

Introduction et contexte	31
Apport de la télémétrie passive ou RFID	31
Apport de la télémétrie active	34
Utilisation de dispositifs de vidéo-comptage	36
Utilisation d'outils d'analyse de flux	37
Apport de la génétique du paysage	41
Utilisation de l'ADN environnemental	41
Conclusion et perspectives	43
Références citées	46



“ L'aménagement réalisé permet le franchissement des truites dans la gamme de débits utilisée pour son dimensionnement ”



# I. SUIVIS PAR LA TECHNOLOGIE RFID - ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT PISCICOLE DE LA BUSE OH 448 DE L'A89 SUR LA DUROLLE (PUY-DE-DÔME,63)

D'après Caudron et al. (2020)<sup>1</sup>

## LE CONTEXTE 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 et 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 puydômoise (Figure 1) située en tête de bassin, qui abrite une population de truites fonctionnelle et abondante. L'ouvrage hydraulique OH448 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% (Figure 2). Il représentait un obstacle infranchissable 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 (Figure 3). Le dispositif a été théoriquement conçu pour assurer des conditions hydrauliques favorables au franchissement de la truite pour des débits compris entre le QMNA5<sup>1</sup> et 2.5 fois le module<sup>2</sup>, soit de 0.18 à 2.50 m<sup>3</sup>/s, avec une plage préférentielle de fonctionnement entre 0.78 et 1.19 m<sup>3</sup>/s. 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 (Figure 4).

Une étude post-travaux a été réalisée dans le but d'évaluer la fonctionnalité de ces aménagements sur le plan biologique en s'intéressant à la



Figure 1 : Localisation de la Durolle, dans le Puy-de-Dôme, Région Auvergne-Rhône-Alpes.

1 Le QMNA5, exprimé en m<sup>3</sup>/s, est le débit mensuel minimal (ou QMNA) ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassée une année donnée, c'est donc la valeur du QMNA telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq ou vingt années par siècle. C'est un débit statistique qui donne une information sur la sévérité de l'étiage.

2 Le module représente l'équivalent en m<sup>3</sup>/s de la quantité totale d'eau circulant pendant une année moyenne sur un tronçon de rivière.

## ENCADRÉ EXPLICATIF N°1

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 (Illustration 1). 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.

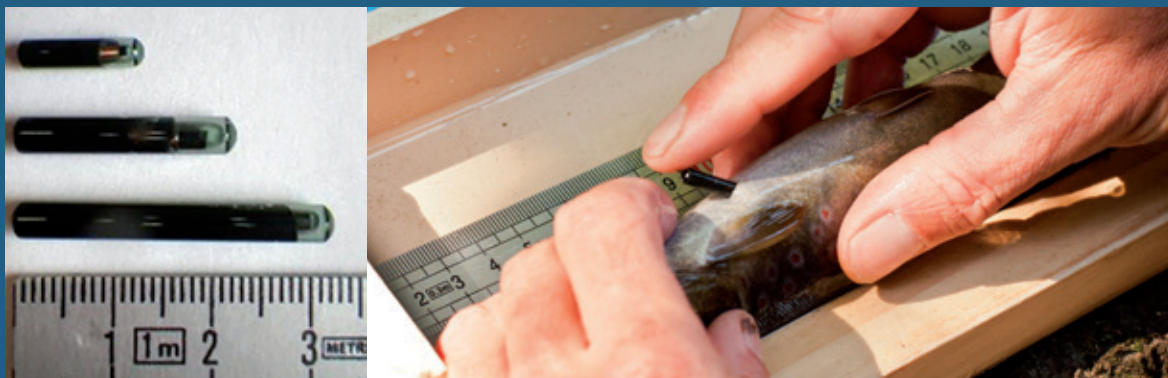


Illustration 1 : Différentes tailles de transpondeurs (à gauche) utilisables pour le marquage des truites (à droite).

Chaque transpondeur est caractérisé par un code 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 (Illustration 2). 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.

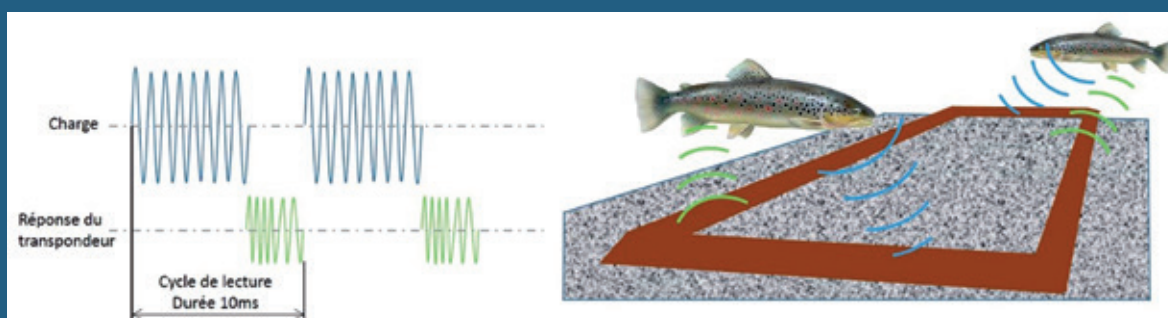


Illustration 2 : Illustration du principe de détection d'un transpondeur implanté dans une truite.

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.



Figure 2: Buse OH 448, de type ARMCO en tôle ondulée, longue de 104 mètres et présentant une pente de 1%.



Figure 3: Dispositif hydraulique unique constitué d'une semelle rugueuse et de ralentisseurs préfabriqués.



Figure 4: Sortie aval de la buse avant (à gauche) et après (à droite) les travaux de correction.

franchissabilité de la buse par les truites. Le franchissement en montaison a été étudié pendant deux cycles de migration complets, en utilisant la technologie RFID (Radio Frequency Identification) qui a permis de suivre les déplacements d'individus marqués à l'aide de transpondeurs passifs ou PIT tags (*voir encadré explicatif n°1*).

### DISPOSITIF ET STRATÉGIE DE SUIVI

Un dispositif RFID fixe a été installé en amont immédiat de la buse dans le but de détecter les poissons marqués ayant franchi l'ouvrage, pendant les deux ans de l'étude, de juillet 2017 à août 2019. Le dispositif se compose de deux antennes installées à plat sur toute la largeur du lit (6-7 mètres), reliée chacune à un lecteur/enregistreur RFID permettant d'enregistrer l'identifiant du poisson, la date et l'heure de passage (Figure 5). Les contraintes du site (sécurisation du matériel et alimentation électrique) n'ont pas permis d'installer de dispositif RFID fixe en aval de la buse pour détecter les individus marqués entrant dans l'ouvrage.

Une marque témoin, programmée pour être détectée toutes les trente minutes, a été placée au niveau de chaque antenne, afin de contrôler

son bon fonctionnement. Un transfert quotidien des données à distance par GSM a permis de réaliser une veille sur le fonctionnement du dispositif.

Sur les 730 jours du suivi, les antennes ont correctement fonctionné la grande majorité du temps : l'antenne 1 a fonctionné 99.2 % du temps et l'antenne 2, 97.4 % du temps.

L'efficacité de détection du dispositif a été estimée à 99.9 % d'après la formule de Zydlewski *et al.* (2006)(2), ce qui signifie que la probabilité qu'un poisson marqué ne soit pas détecté par le dispositif est quasi nulle.

Les données collectées par le dispositif fixe sont donc suffisamment représentatives pour permettre une analyse fiable du franchissement de la buse par les truites.

En complément, sept campagnes de prospection mobile ont été réalisées entre le 2 mai 2018 et le 1<sup>er</sup> août 2019 avec trois objectifs :

1. Évaluer un potentiel effet bloquant de la buse en recherchant une éventuelle accumulation de poissons migrants en aval ;
2. Recueillir de nouvelles connaissances sur les comportements de migration et de sédentarité de la truite commune ;
3. Rechercher d'éventuelles truites marquées en amont de la buse qui n'auraient pas été

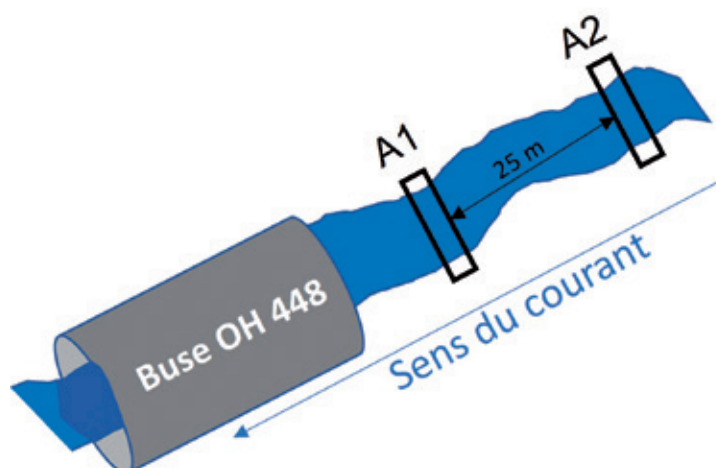


Figure 5 : À gauche : schéma d'équipement de la buse OH 448 à l'aide d'antennes RFID fixes. Les encadrés A1 et A2 représentent les antennes RFID fixes installées en amont de la buse. À droite : illustration d'une antenne installée dans la Durolle.



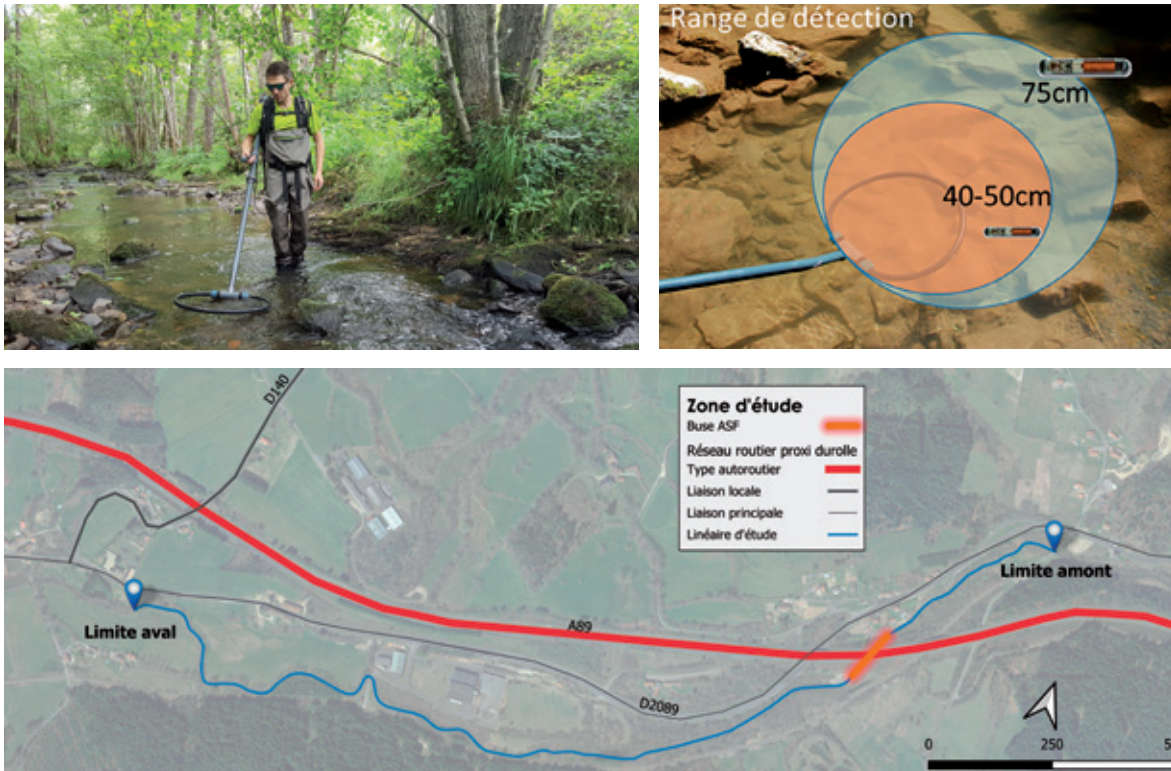


Figure 6: Linéaire d'étude, pratique d'une prospection mobile et portée de détection des antennes mobiles. Les limites signalées sur la carte encadrent le parcours réalisé lors des prospections mobiles.

détectées par le dispositif fixe.

La méthode a consisté à parcourir la rivière de l'aval vers l'amont à deux opérateurs munis chacun d'un lecteur/enregistreur RFID et d'une antenne portable en prospectant l'ensemble des habitats. Un GPS synchronisé avec les lecteurs/enregistreurs permet de connaître la position de chaque transpondeur détecté avec une précision de l'ordre de 5 à 10 mètres.

Ces prospections ont été réalisées sur un linéaire de 1680 mètres en aval de la buse, plus 560 mètres en amont de la buse (Figure 6).

### LA TRUITE (*SALMO TRUTTA L.*), L'ESPÈCE CIBLE

Au cours des deux années de suivi, 815 truites de tailles supérieures à 100 mm (longueur totale comprise entre 103 à 350 mm) ont été marquées

avec des transpondeurs (Figure 7). Les captures ont été réalisées par pêche électrique de sondage à l'aide d'un appareil de pêche portatif. Chaque individu a été anesthésié dans un bain d'eugénol, mesuré (longueur totale au mm près) puis marqué avec un transpondeur. Pour ce faire, une petite incision ventrale a été réalisée à l'aide d'un scalpel, puis la marque a été introduite dans la cavité péritonéale. Après marquage, les individus ont été maintenus en observation dans un bac de réveil afin qu'ils retrouvent toute leur capacité natatoire avant d'être libérés dans la rivière (Figure 8).

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. Le projet a reçu l'agrément du comité d'éthique et du ministère en charge de la recherche sous le numéro #10286.

Aucune perte de marque n'a été constatée immédiatement après marquage. Le taux de rétention post-marquage chez la truite commune pour des individus de taille supérieure à 100 mm est généralement proche de 100 % (Vatland et Caudron, 2015)(3).

La plupart des captures de truites (716 ind.) ont été réalisées à l'aval de la buse sur un linéaire total de 1680 mètres. Ces individus ont été marqués puis relâchés sur leur lieu de capture. En complément,

99 poissons ont été capturés en amont de la buse puis transférés après marquage en aval direct de la buse, dans le but de forcer le comportement de migration vers l'amont. L'hypothèse sous-jacente est que les poissons ainsi déplacés chercheront à retourner vers leur habitat d'origine, et devront donc davantage tenter de franchir la buse que les individus capturés en aval.

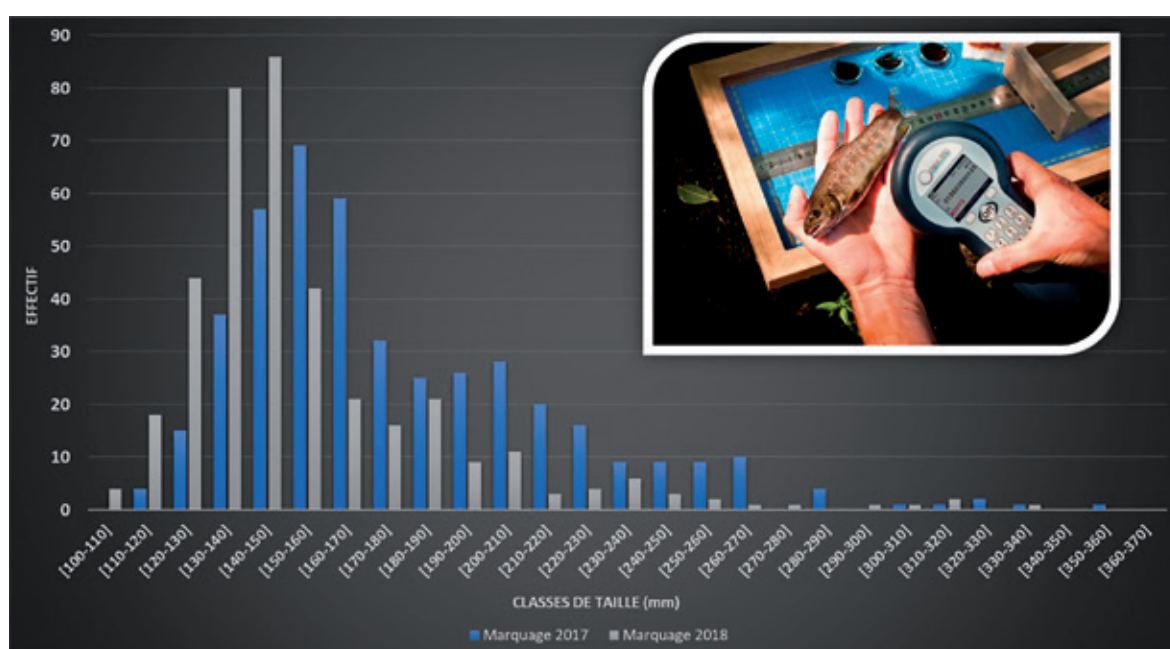


Figure 7: Structure de la population de truites marquées en 2017 et 2018.



Figure 8: Étapes de marquage des truites suivies durant l'étude: de leur capture à leur remise à l'eau.

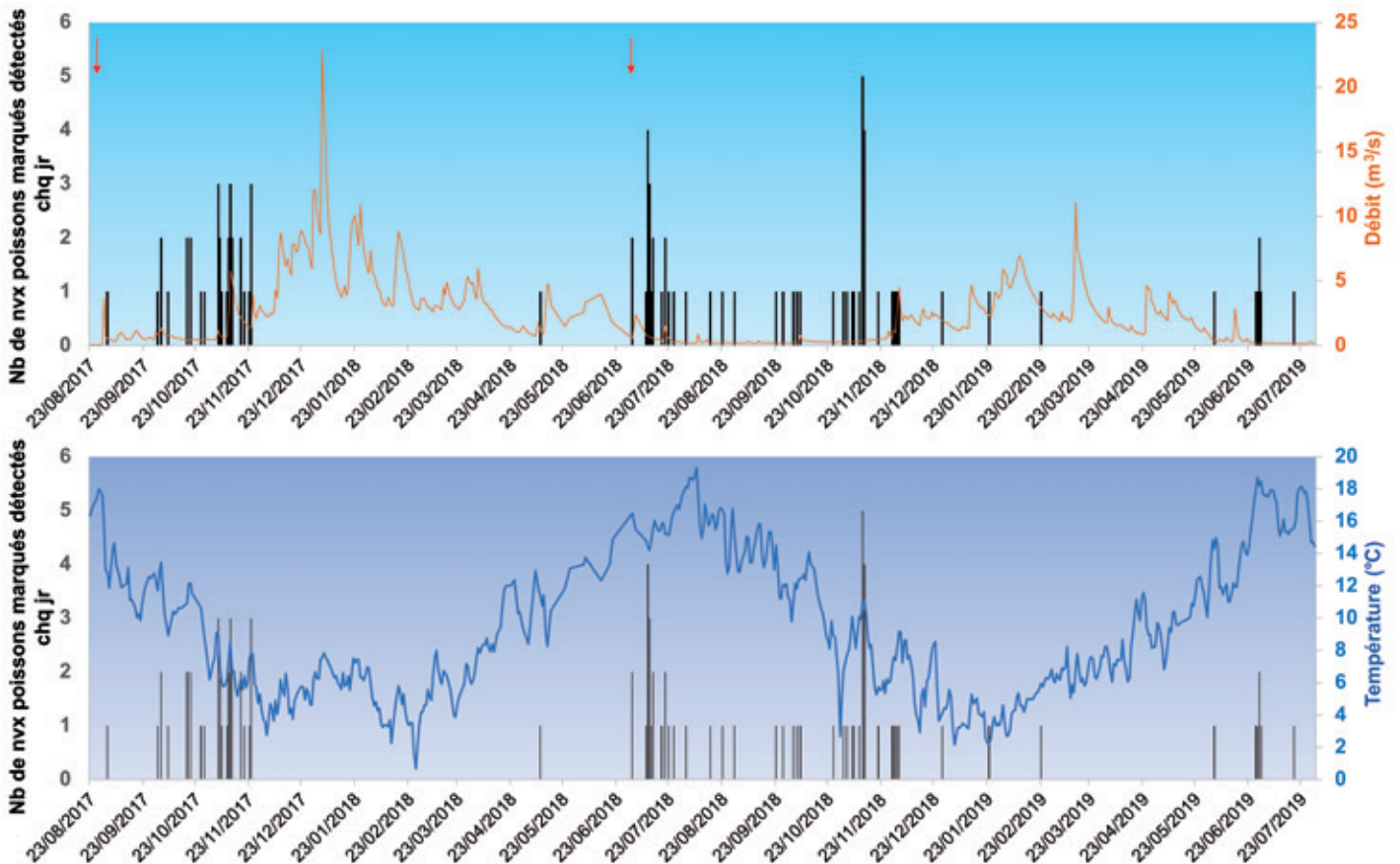


Figure 9 : Nombre de nouvelles truites détectées chaque jour par les antennes fixes en amont de la buse et chroniques des températures et des débits pendant la période d'étude (flèches rouges = marquage).

## PRINCIPAUX RÉSULTATS

Au total, sur les 815 truites marquées, 165 ont franchi la buse aménagée en étant détectées par le dispositif RFID fixe et 450 ont été détectées au moins une fois en aval de la buse par prospection mobile. 200 individus n'ont donc jamais été redétectés.

Les éléments suivants indiquent que le dispositif hydraulique permet une bonne franchissabilité de la buse par les truites :

- 75 % des individus capturés en amont de la buse et transloqués en aval ont franchi la buse ;
- La grande majorité des individus transférés ont franchi la buse lors de la première semaine de suivi (99 % en 2017 et 53 % en 2018) ;
- Aucune sélection de la buse sur la taille des poissons échantillonnés (103-305 mm) n'a été observée (Figure 10) ;

- Il n'a pas été mis en évidence d'accumulation de poissons marqués au pied de la buse ;
- L'aménagement réalisé permet le franchissement des truites dans la gamme de débits utilisée pour son dimensionnement QMNA5-2,5\*Module [0,18-2,5 m³/s] (Figure 9) ;
- Une part notable des franchissements (11 %) a eu lieu à des débits supérieurs au dimensionnement théorique (> 2,5\*Module) (Figure 10).

D'autres résultats apportent des connaissances supplémentaires sur l'écologie et le comportement migratoire de l'espèce :

- La proportion de truite migrante est faible puisqu'environ 13 % de la population en place en aval a franchi l'ouvrage.
- La majorité des truites ont un comportement plutôt sédentaire avec des déplacements limités autour de 100 à 200 mètres.

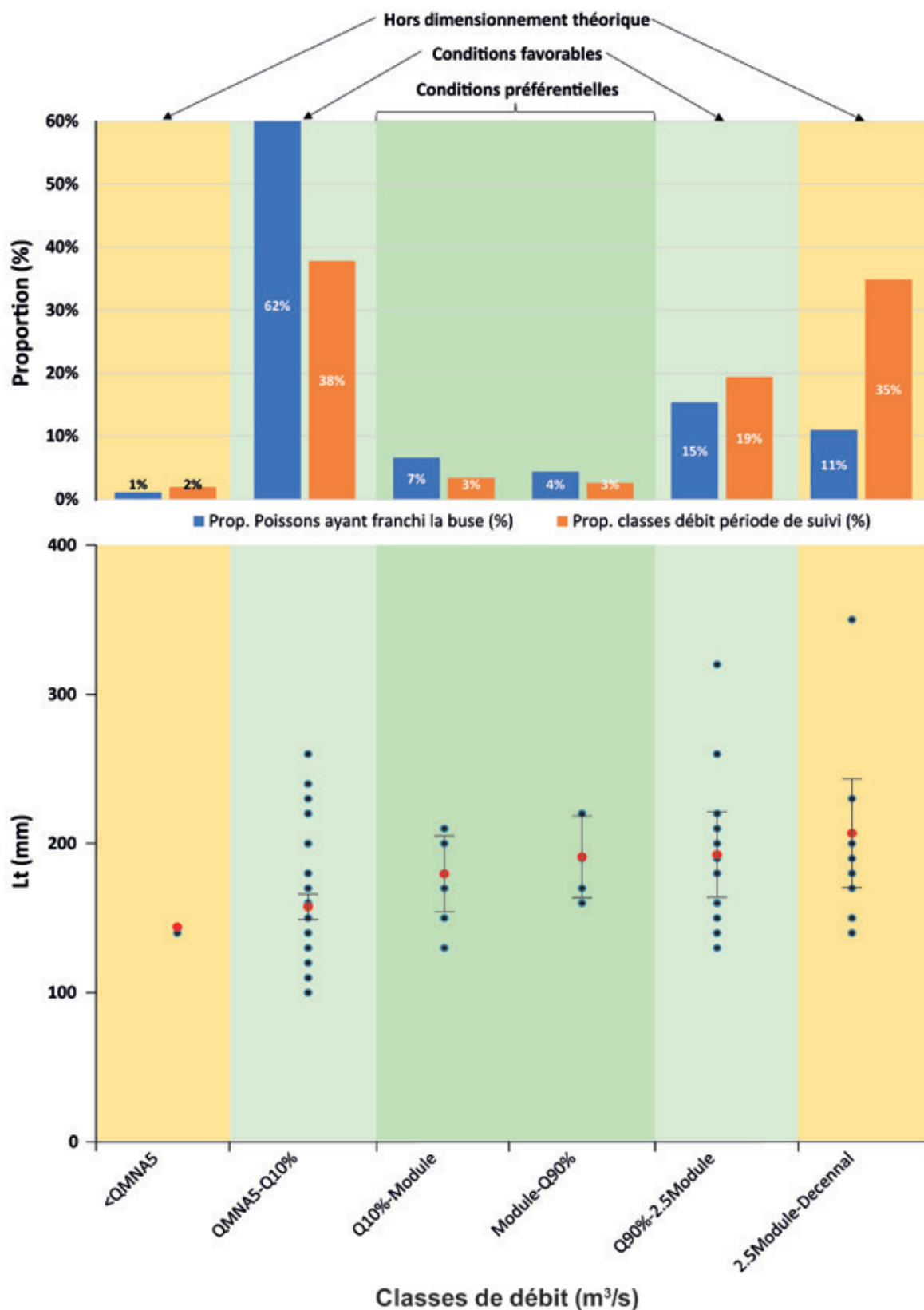


Figure 10 : Relations entre les franchissements enregistrés et les classes de débits utilisées pour le dimensionnement hydraulique du dispositif de franchissement (verts = différentes plages de débits utilisées pour dimensionner le dispositif, rose = plage de débits hors dimensionnement de l'ouvrage). Distribution des débits observés pendant le suivi et proportion de poissons ayant franchi la buse pour chaque classe de débit (en haut). Répartition des tailles des truites ayant franchi la buse en fonction du débit (en bas).

- La période de franchissement s'étale entre juillet et mi-novembre pour les deux années avec une majorité des franchissements (80%) se concentrant sur les mois d'octobre et novembre.
- Un effet distance à la buse a été observé, avec un taux de franchissement plus important pour les individus ayant été relâchés dans les 300 mètres en aval de l'ouvrage, par rapport aux truites marquées plus en aval. Il est aussi intéressant de souligner que quelques individus relâchés à environ 1.5 km en aval de la buse ont franchi l'ouvrage.
- Aucune influence claire de la température n'a été notée (Figure 9). 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).

### ENSEIGNEMENTS SUR LE PROTOCOLE DÉPLOYÉ ET L'EMPLOI DE LA TECHNOLOGIE RFID

Les résultats précis obtenus par la technologie RFID ont permis d'évaluer le franchissement de la buse aménagée et de statuer sur l'efficacité des aménagements hydrauliques réalisés.

Cette technologie est particulièrement adaptée pour réaliser des suivis d'ouvrages de franchissement sur un nombre conséquent d'individus de tailles variées.

Le protocole mis en place, couplant un dispositif de détection fixe localisé en amont immédiat de la buse et plusieurs 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. D'autre part, les prospections mobiles répétées ont permis de statuer sur l'absence d'effet bloquant de la buse et de fournir des

connaissances sur la dispersion des truites qui ont révélé l'existence d'un comportement majoritairement sédentaire des individus au sein de la population.

La période de suivi sur deux années complètes apparaît nécessaire, 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 important 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, mais nécessaire pour prendre en compte la diversité des comportements migratoires sur un petit cours d'eau comme la Durole.

Enfin, 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 Durole.

### BIBLIOGRAPHIE CITÉE

1. Caudron A, Bergé J, Richard A, Heurtebise C. La technologie RFID pour évaluer le franchissement piscicole d'une buse aménagée de grande dimension. *Revue Science Eaux & Territoires*. Hors série(66):7.
2. Zydlewski GB, Horton G, Dubreuil T, Letcher B, Casey S, Zydlewski J. Remote monitoring of fish in small streams: a unified approach using PIT tags. *Fisheries*. 2006;31(10):492-502.
3. Vatland S, Caudron A. Movement and early survival of age-0 brown trout. *Freshwater biology*. 2015;60(7):1252-62.



“ Durant l'étude, 25 saumons ont été capturés dont 24 marqués. ”

## II. SUIVI PAR RADIOTÉLÉMÉTRIE - ÉVALUATION DU FRANCHISSEMENT DES AMÉNAGEMENTS DU SEUIL A89 SUR LA RIVIÈRE ALLIER PAR LE SAUMON ATLANTIQUE (PUY-DE-DÔME,63)

### LE CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Le Saumon Atlantique (Figure 11) est une espèce emblématique de la biodiversité aquatique du bassin Loire-Allier. Cette espèce est aujourd'hui particulièrement vulnérable du fait d'un nombre important de facteurs agissant en synergie. Les problématiques de continuité écologique sont au cœur des menaces qui pèsent sur l'espèce, en particulier en raison de l'importance du linéaire de rivière que les géniteurs doivent parcourir pour rejoindre les premières frayères de qualité. Des études récentes (1,2), basées sur le suivi individuel de saumons par radiotélémétrie, ont notamment identifié un effet retard induit par plusieurs ouvrages. Cet effet retard, dans un contexte hydro climatique de plus en plus contraignant pour l'espèce, se traduit en particulier par une augmentation des risques de mortalités estivales (3).

Dans ce contexte et afin de répondre aux obligations réglementaires liées à la restauration de la continuité écologique, VINCI Autoroutes a engagé en 2014 des études de dimensionnement de son seuil dénommé « A89 » (Figure 12) sur la rivière Allier, puis les travaux de mise en conformité de son seuil qui se sont achevés en octobre 2017. Ces travaux ont consisté à abaisser la crête de l'ouvrage de moitié et à créer une rampe rugueuse latérale à double pendage (Figure 13).

En 2018, une étude de faisabilité a permis de définir, en collaboration avec les services de l'État (DDT, OFB<sup>1</sup> direction régionale et pôle échohydraulique) et les acteurs techniques locaux (LOGRAMI, FDAAPPMA, APS, CNSS<sup>2</sup>), l'ensemble des modalités du suivi post-travaux qui a débuté au printemps 2019 (voir encadré explicatif n°2 pour une explication de la technologie).

L'objectif prioritaire du suivi télémétrique (présenté ici) était de répondre à l'exigence réglementaire et d'être *in fine* en capacité d'évaluer dans quelle mesure l'effet retard du seuil A89 à la migration génésique des saumons a été atténué.

À noter aussi que la DDT du Puy-de-Dôme a réalisé en parallèle l'aménagement du seuil des Madeleines (situé 2.3 km en amont du seuil A89, Figure 14) qui s'est achevé en novembre 2016. Les travaux avaient alors consisté à dérocter la marne pour créer des bassins successifs sur deux bras de franchissement. De ce fait, le périmètre de l'étude télémétrique réalisée en 2019 incluait aussi le seuil des Madeleines afin d'estimer le gain probable apporté par ces travaux sur la migration des saumons. Néanmoins, par souci de concision, les résultats spécifiques au seuil des Madeleines ne sont pas détaillés dans ce document. Plus de détails concernant cette étude et les résultats spécifiques au seuil des Madeleines peuvent être retrouvés dans le rapport datant de 2020(4) (SCIMABIO Interface).

### LE LINÉAIRE D'ÉTUDE

Sur l'axe Allier, la zone d'étude s'étend du barrage de Vichy à l'aval (zone de piégeage et de marquage des saumons) jusqu'à l'amont immédiat (+/- 1 km) du seuil des Madeleines. Le linéaire d'étude sur la rivière Allier est d'environ 53 km (Figure 14). À partir de Pont du Château, le suivi des poissons marqués est assuré par LOGRAMI.

La Dore est également intégrée dans la zone d'étude, depuis sa confluence avec l'Allier jusqu'à la station hydrologique DREAL de Pont de Dorat (linéaire d'environ 21 km).

1 L'Office français de la biodiversité

2 Loire Grands Migrateurs / Fédération départementale des associations agréées de pêche et de protection des milieux aquatiques / Association Protectrice du Saumon / Conservatoire National du Saumon Sauvage



Figure 11 : Photographies de saumons en transit dans la passe de Vichy (©SCIMABIO Interface, 2019).



Figure 12 : Photographie du seuil A89 (ROE 63404) avant travaux. ©Vinci Autoroutes





Figure 13 : Modélisation 3D de la rampe asymétrique. Photographies du seuil A89 après aménagement à 2 périodes distinctes. ©Vinci Autoroutes

Sur cette zone, un secteur plus resserré a fait l'objet d'une attention particulière avec un maillage de plusieurs stations fixes de suivi. Ce secteur s'étend de l'aval du seuil de Joze à l'amont du seuil des Madeleines soit un linéaire d'environ 7 km.

### UN DISPOSITIF DE CAPTURE ET DE MANIPULATION ADAPTÉ AU SAUMON ATLANTIQUE

Le système de capture des saumons est situé à Vichy (03) en rive droite de l'Allier. Les saumons étant obligés d'utiliser la passe à poissons pour franchir le pont barrage, ils se retrouvent dans le piège qui est positionné à la sortie piscicole de l'ouvrage de franchissement (Figure 15).

À la suite de leur capture, les saumons sont manipulés suivant les différentes étapes présentées dans la Figure 16. Les poissons

sont tout d'abord transférés vers le bac de « stabulation » de la structure de manipulation et de marquage préalablement remplie d'eau. Les poissons sont ensuite guidés dans le bain d'anesthésiant, préparé à l'aide d'une solution d'huile essentielle de clou de girofle qui est diluée dans l'eau du bac pour obtenir une concentration finale adaptée à l'anesthésie de l'espèce. Une fois endormi, la manipulation du saumon débute par une description précise de l'état sanitaire et de la taille du poisson.

L'étape suivante consistait au marquage du saumon par voie intra gastrique : l'émetteur est introduit par la bouche puis est placé directement dans l'estomac du poisson à l'aide d'un double tube pousseur en plastique. Les émetteurs utilisés mesuraient 50 mm de long pour un diamètre de 19 mm. Leur antenne gainée mesure une trentaine de centimètres. D'un poids de 24 g, ils présentaient une autonomie d'environ 430 jours

avec des fréquences d'émission comprises entre 49 et 49,9 MHz. Le poids de ces émetteurs représentait moins de 1% du poids du poisson pour éviter toute perturbation comportementale du saumon(5).

Le poisson est ensuite placé dans un bac de réveil obscur directement dans l'Allier et repart de lui-même après son réveil.

Le protocole mis en place respectait 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 préfectoral n°3570/2018. Le protocole de marquage a été validé par le comité d'éthique CECCAPP de Lyon, réalisé par des opérateurs habilités et le projet

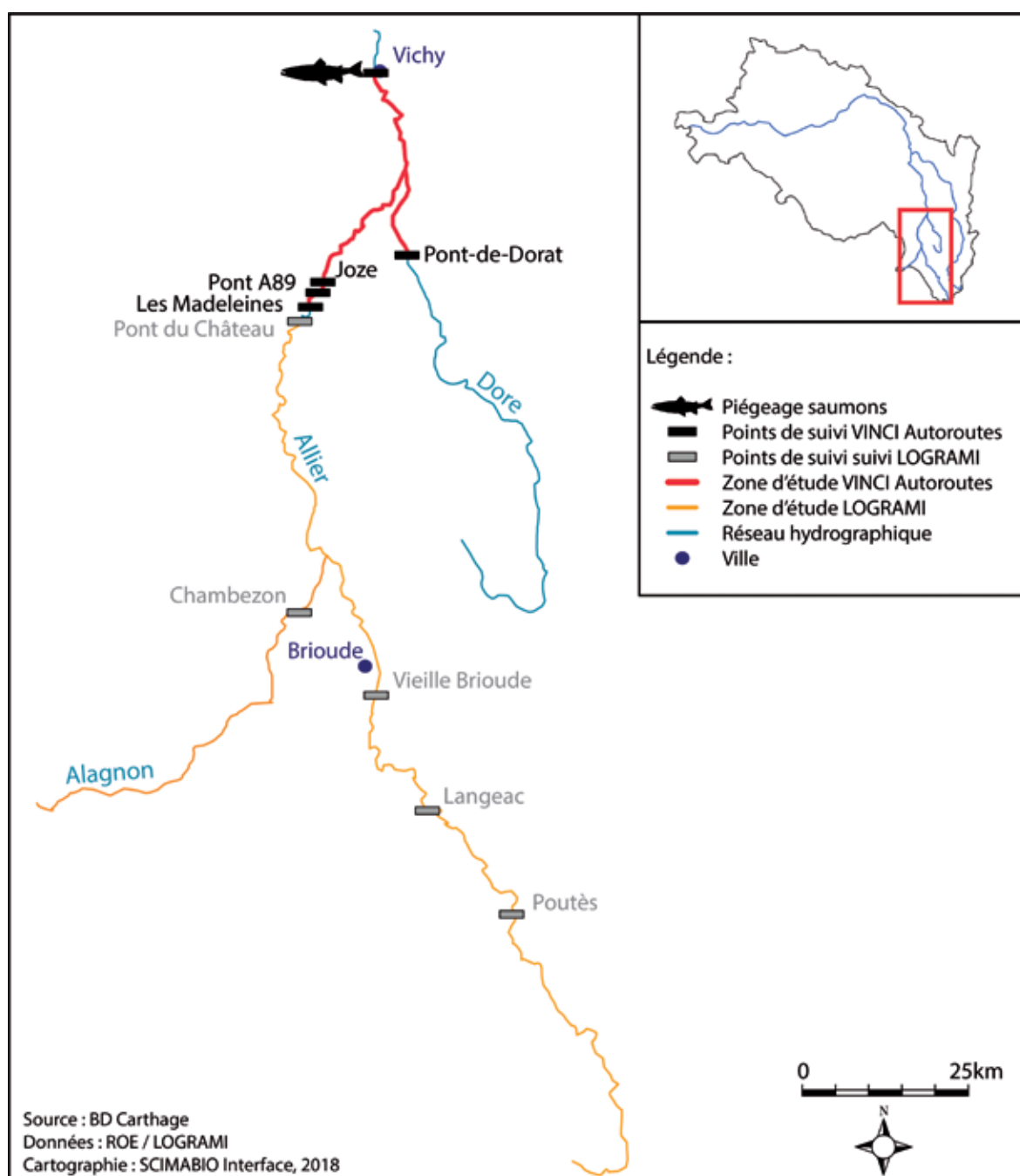


Figure 14 : Zone de suivi 2019 des saumons par radiopistage dans le bassin versant de l'Allier (encadré).

a reçu l'agrément du ministère de la Recherche sous le numéro 18567.

### LES SAUMONS ATLANTIQUE MARQUÉS ET SUIVIS DURANT L'ÉTUDE

Durant l'étude, 25 saumons ont été capturés dont 24 marqués. Un individu qui présentait un état sanitaire très préoccupant a été relâché sans

être marqué, conformément aux engagements du protocole. À noter que durant l'année 2019, 374 saumons adultes en migration de montaison ont été comptés à la station vidéo-comptage de Vichy par LOGRAMI (Figure 17).

La campagne de piégeage a débuté le 26 mars 2019. L'essentiel des passages à Vichy a eu lieu entre fin mars et début juin lorsque la température de l'eau était inférieure à 20°C (Figure 18). Le pic

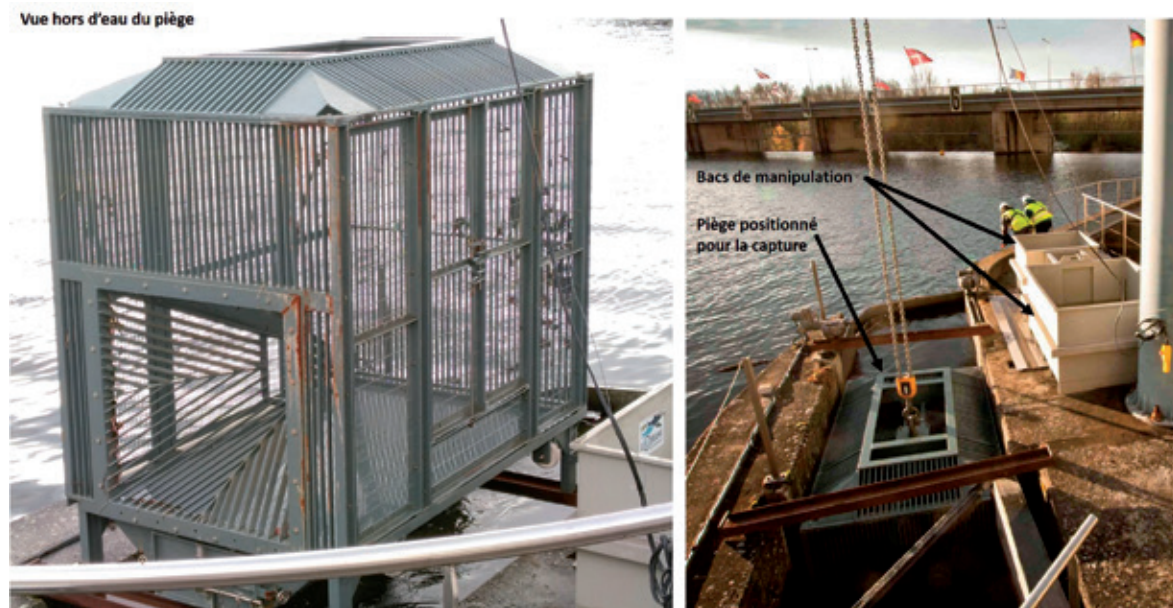


Figure 15 : Piège servant à la capture des saumons implanté dans la sortie piscicole de la passe à poissons en rive droite de l'Allier à Vichy (Photos SCIMABIO Interface)

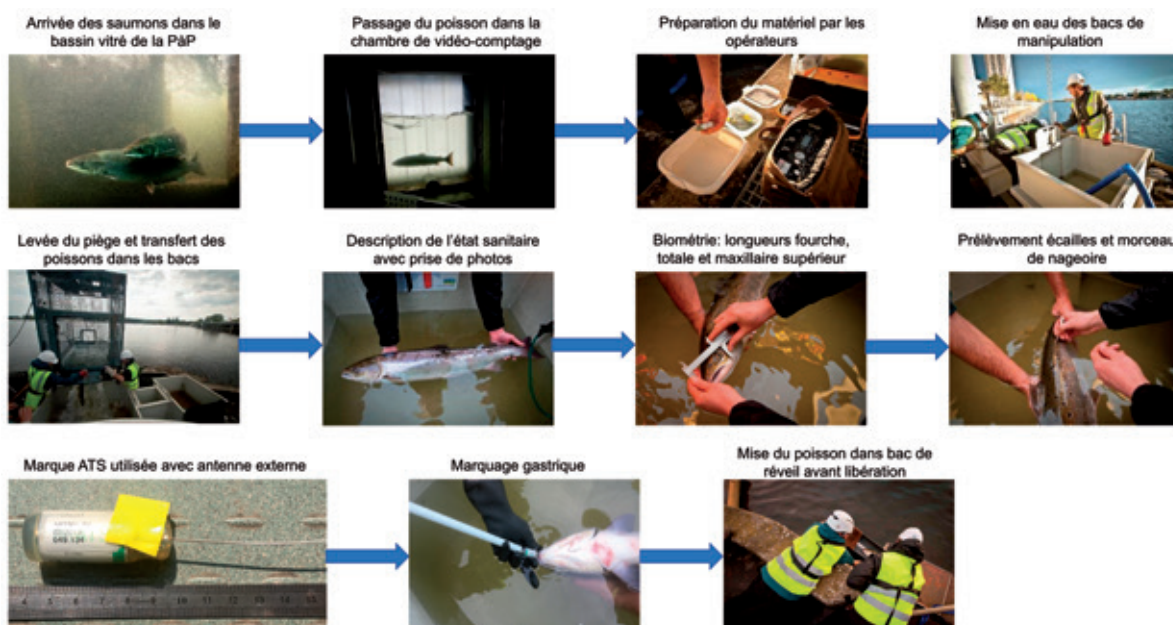


Figure 16 : Illustration de l'ensemble du protocole de capture et marquage des saumons au niveau du piège de Vichy. (@SCIMABIO Interface, 2019).

de remontée est corrélé à l'unique augmentation importante de débit les 26 et 27 avril où 70 saumons sont passés en 48 heures.

La majorité des poissons marqués (54%) présentait un état sanitaire classé moyen contre 28% classé très satisfaisant ou satisfaisant (Figure 19 à gauche). La répartition en âge des saumons marqués était de 58% de trois étés et 42% de deux étés (Figure 19 à droite).

Enfin, la longueur totale des poissons marqués

varie de 70 à 104 cm avec une majorité d'individus dans les classes de taille 90-95 cm puis 75-80 cm (Figure 20).

## CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DE SUIVI

Les conditions hydrologiques montrent des débits globalement faibles à très faibles sur la quasi-totalité de la saison de migration 2019. Les

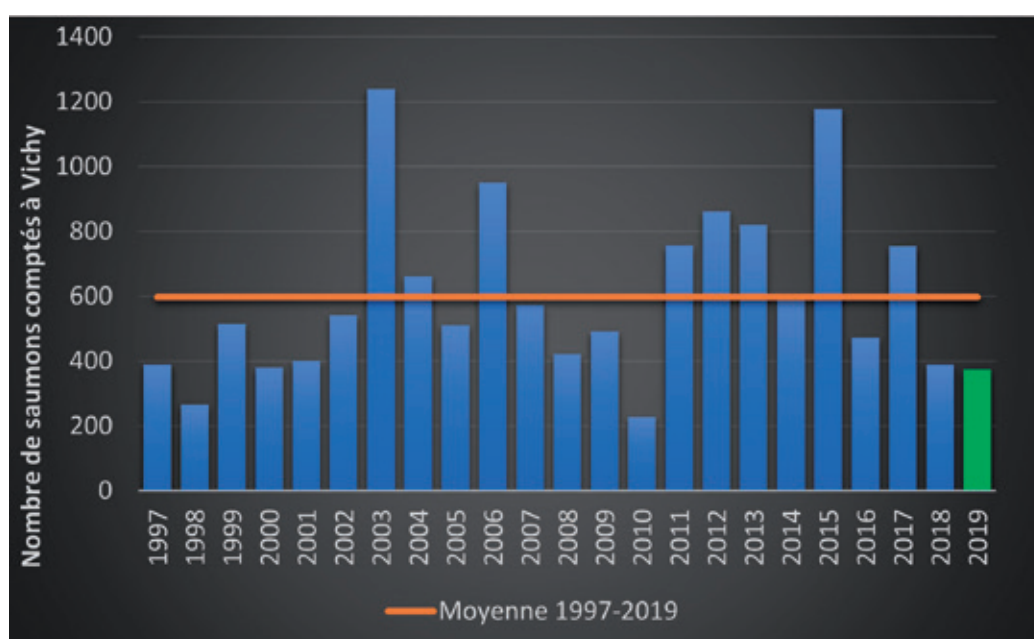


Figure 17: Chronique du nombre de saumons comptés par vidéo à Vichy (données LOGRAMI).

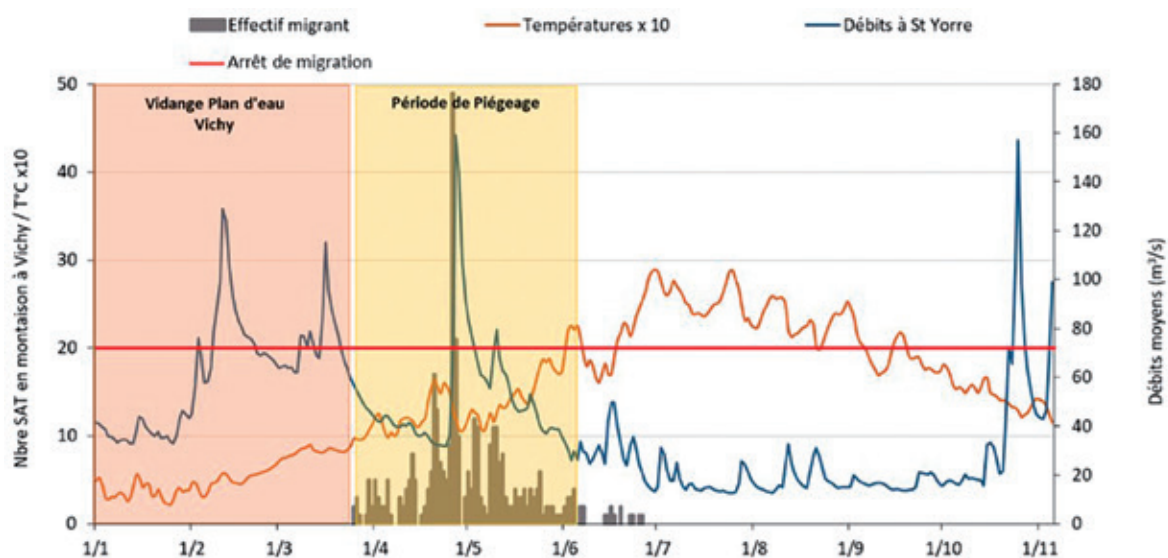


Figure 18 : Distribution temporelle des effectifs de saumon migrant à Vichy en 2019 en relation avec les débits et les températures d'eau (données LOGRAMI et banque HYDRO).

débites observés sont systématiquement en deçà des débits moyens sur l'ensemble de l'année notamment pendant la période de marquage et de suivi (Figure 21).

Concernant la thermie, la chronique de 2019 montre que l'optimum thermique pour la migration du saumon atlantique est obtenu sur l'Allier pendant des périodes assez courtes durant le suivi, de fin mars à fin mai, puis de début octobre à début novembre. Pendant quatre mois, de début juin à début octobre, les températures de l'eau dépassent 20°C, considéré comme un seuil d'arrêt de migration (6,7).

Au cours de cette année, deux mois consécutifs de mi-juin à mi-août, les températures de l'eau ont dépassé les valeurs critiques pour la survie du saumon et ont même atteint pendant plusieurs jours des valeurs considérées comme létales pour l'espèce (Figure 22).

### UN DISPOSITIF DE SUIVI ADAPTÉ À LA ZONE D'ÉTUDE ET AU QUESTIONNEMENT GÉNÉRAL

Le dispositif de suivi mis en place sur la zone d'étude était tout d'abord constitué de 7 stations fixes gérées par SCIMABIO Interface et la FDPPMA63 auquel il faut ajouter la station fixe aval Vichy mise en place et gérée par LOGRAMI (Figure 23).

Chaque station fixe était composée d'un récepteur-enregistreur radio ATS 4500S, connecté à une antenne aérienne boucle. Pour

les stations ne disposant pas de moyen de sécurisation existant, le matériel a été protégé à l'aide d'un caisson métallique étanche et inviolable qui a été enterré pour des raisons de discrétion (Figure 24).

Les récepteurs enregistreurs ont été programmés pour scanner les fréquences des émetteurs avec un temps de scan de 3 secondes. Lorsqu'un saumon radiomarqué entre dans une zone de détection, le signal est détecté par le récepteur qui l'enregistre automatiquement en incrémentant la date, l'heure (UTC), le nombre de détections et la puissance du signal.

Les 8 stations fixes situées sur la zone d'étude ont fonctionné pendant toute la durée du suivi sans interruption majeure. Sur les 4 stations encadrant les seuils de l'A89 et des Madeleines, la proximité des antennes amont et aval seuils a permis de calculer une efficacité de détection pour chaque station: cette dernière est comprise entre 93 et 100%, suivant la station considérée. Au dispositif de suivi fixe, se sont rajoutées des prospections mobiles (en véhicule, à pied ou en canoé, Figure 25) qui ont permis de suivre le déplacement des poissons entre les zones couvertes par les antennes fixes. Les prospections mobiles ont été réalisées 2 à 3 fois par semaine sur la zone d'étude entre le démarrage du suivi et le 15 juillet.

Les prospections ont surtout été menées sur le secteur compris entre Vichy amont et Joze aval, afin d'identifier la position et le statut des saumons marqués présents sur ce linéaire

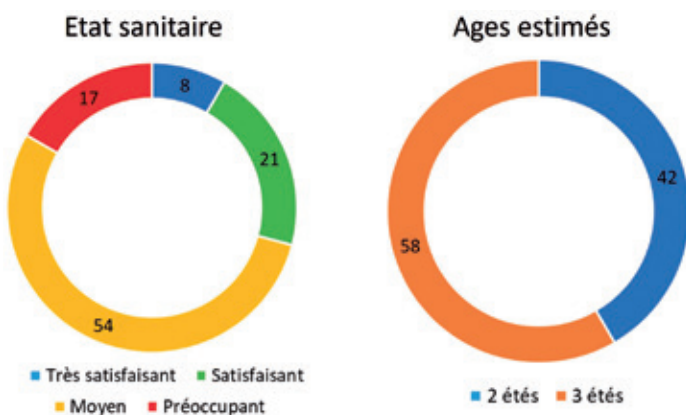


Figure 19: État sanitaire des saumons piégés et marqués à Vichy au cours de l'étude (à gauche) et âges estimés par le rapport taille/âge (Bach et al. 2016) des mêmes individus.

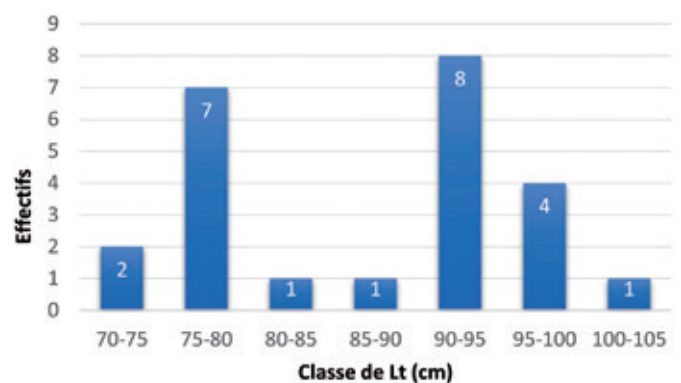


Figure 20: Répartition par classe de taille des saumons marqués en 2019.

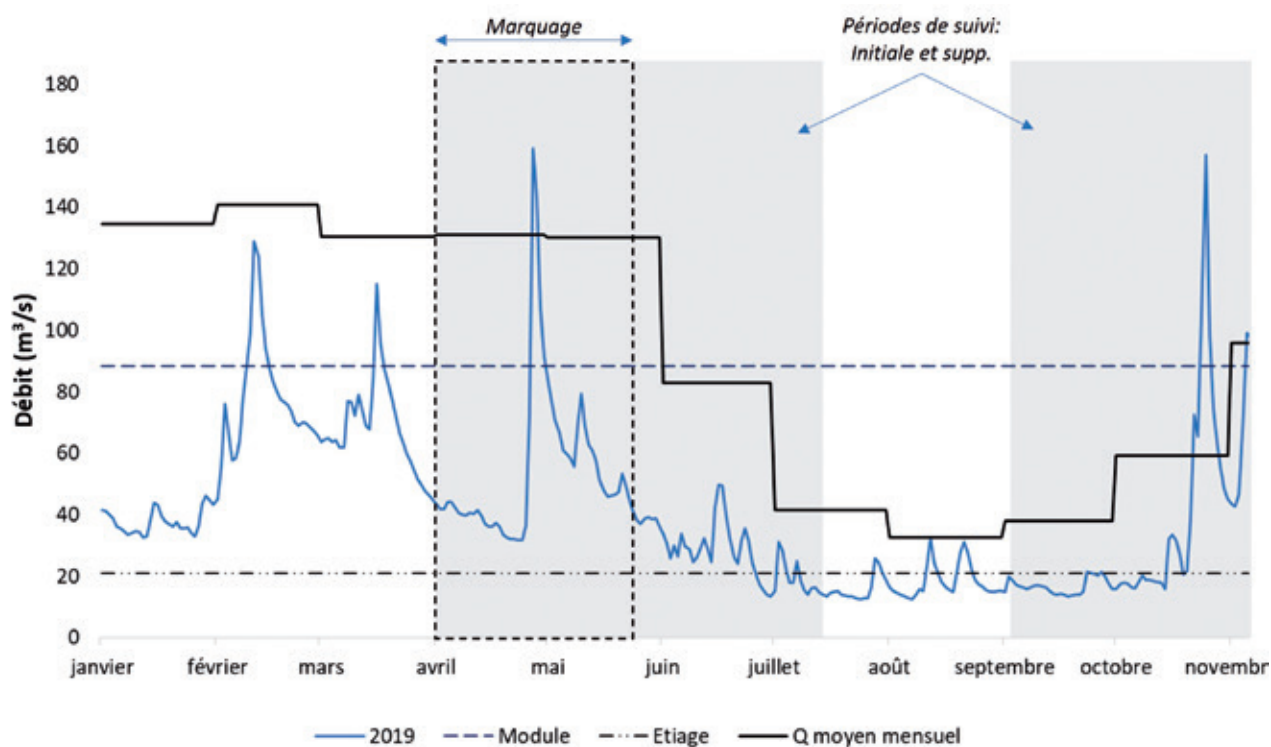


Figure 21 : Débits moyens journaliers de l'Allier en 2019 enregistrés à Saint-Yorre et statistiques caractéristiques de débits (module, étiage, Q moyen mensuel).

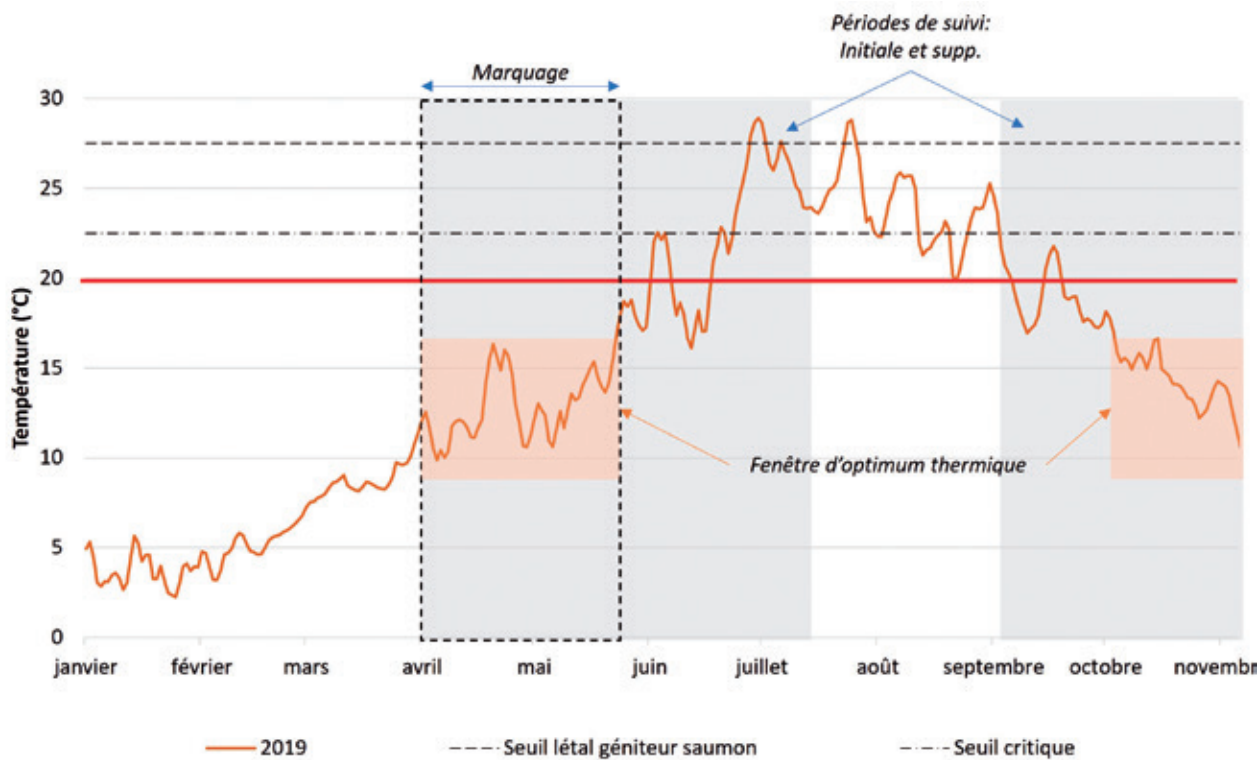


Figure 22 : Températures moyennes journalières de l'Allier à Vichy en 2019 en rapport avec les exigences écologiques du saumon atlantique.

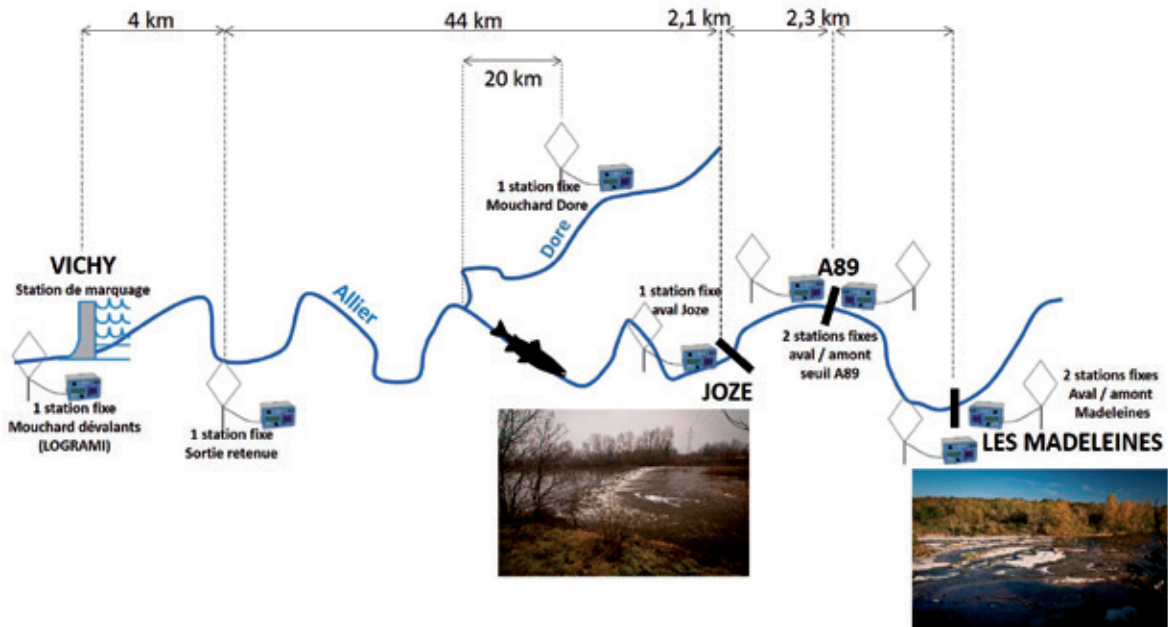


Figure 23 : Schéma d'implantation des 7 stations de suivi fixes mise en place sur la zone d'étude «Vinci autoroutes» + la station aval Vichy de LOGRAMI.



Figure 24 : Photos d'exemples d'installation de stations fixes et d'antennes.



Figure 25 : Photos de prospections mobiles à pied et en canoé.

<b>Période de piégeage :</b>	26 mars - 26 mai 2019
<b>Jours effectifs de piégeage :</b>	10
<b>Période de suivi (2019) :</b>	26 mars - 15 juillet 05 septembre - 5 novembre
<b>Tracking mobile complet en bateau :</b>	mi-juillet mi-septembre
<b>Nb SAT piégés :</b>	25
<b>Nb SAT marqués :</b>	24
<b>Nb SAT détectés au seuil A89 :</b>	13 (54% de l'effectif)
<b>Nb SAT en migration en amont de la zone d'étude :</b>	11
<b>Nb SAT perdus / morts sur la zone d'étude (du 26/03 au 05/11/2019) :</b>	13

Tableau 1 : Informations clefs concernant les opérations de marquage et de suivi des saumons pour étudier le franchissement des seuils A89 et des Madeleines.



d'environ 45 km et ne comptant pas de station fixe de suivi.

La finalité du design méthodologique ainsi appliqué a été de répondre aux interrogations suivantes :

- Évaluation d'un éventuel effet bloquant du seuil A89 pouvant induire un retard de migration pour les saumons ;
- Évaluation du temps de franchissement du seuil A89 et comparaison de ces temps avec ceux déjà obtenus en 2009 lors d'une étude dédiée (avant aménagement du seuil) ;
- Comparaison des temps de migration calculés entre un tronçon référence sans ouvrage (Vichy amont retenue-aval Joze) et un tronçon avec ouvrages aménagés (aval Joze-amont Madeleines) ;
- Identification de classes de débits/ températures préférentielles de franchissement.

## PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les chiffres clefs importants à retenir sont synthétisés dans le Tableau 1. L'analyse des comportements de migration sur le secteur d'étude et de franchissement du seuil A89 a été réalisée sur la base des 13 individus sur 24 marqués qui ont continué leur migration après le marquage jusqu'au seuil A89.

### Caractérisation des saumons ayant franchi le seuil de l'A89

Statistiquement, ces 13 individus ne sont pas différents des 11 autres saumons marqués, que ce soit en considérant leur âge, leur taille, leur état sanitaire ou encore la température de l'eau au moment du relâché.

### Comportement de migration sur la zone d'étude

Les 13 franchissements du seuil A89 s'étalent sur un mois et demi entre le 17 avril et le

1<sup>er</sup> juin 2019. Les 13 saumons montrent un départ post-marquage rapide de la retenue et ne font aucun aller-retour sur les 45 km entre le relâcher et le seuil de Joze. De même, tous les poissons qui se présentent à Joze franchissent l'ensemble des ouvrages de la zone (Joze, A89 et Madeleines) sans aller-retour.

### Vitesse de franchissement des seuils

Les vitesses de franchissement estimées au niveau du seuil A89 montrent une grande variabilité entre individus puisque les vitesses estimées varient entre 0.1 km/h, pour l'individu le plus lent et 1.8 km/h pour l'individu le plus rapide (moyenne=0.7 km/h, ET=0.49, Figure 26).

Les temps de franchissement du seuil A89 sont relativement courts avec une moyenne de 1h30.

### Vitesse de migration comparées entre secteur aménagé et non aménagé et entre 2009 et 2019

Les vitesses de migration entre le secteur non aménagé (Vichy amont retenue-aval Joze) et le secteur aménagé (aval Joze-amont Madeleines) sont comparables (Figure 27) avec respectivement des vitesses moyennes de 0.34 et 0.38 km/h (Kruskal-Wallis  $p < 0,01$ ).

Les vitesses de migration calculées sur l'ensemble du secteur aménagé montrent des valeurs plus faibles que les vitesses calculées par ouvrage. Ce résultat est lié au comportement des saumons qui ont tendance à stabuler en tête de radier juste après les ouvrages. Ce phénomène a déjà été observé en 2009.

### Conditions de débit et température lors des franchissements

Les franchissements ont été observés dans une gamme hétérogène de débits comprise entre 20 et 110 m<sup>3</sup>/s (Figure 28). Le débit semble donc peu influencer les franchissements de l'ouvrage A89.

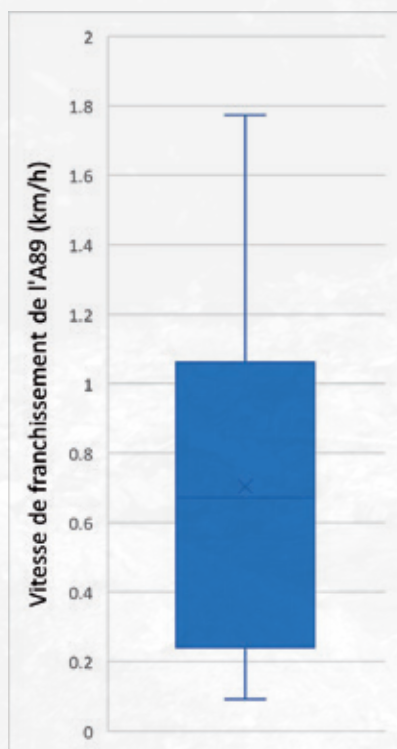


Figure 26 : Box-plot des vitesses de franchissement estimées au niveau du seuil A89.

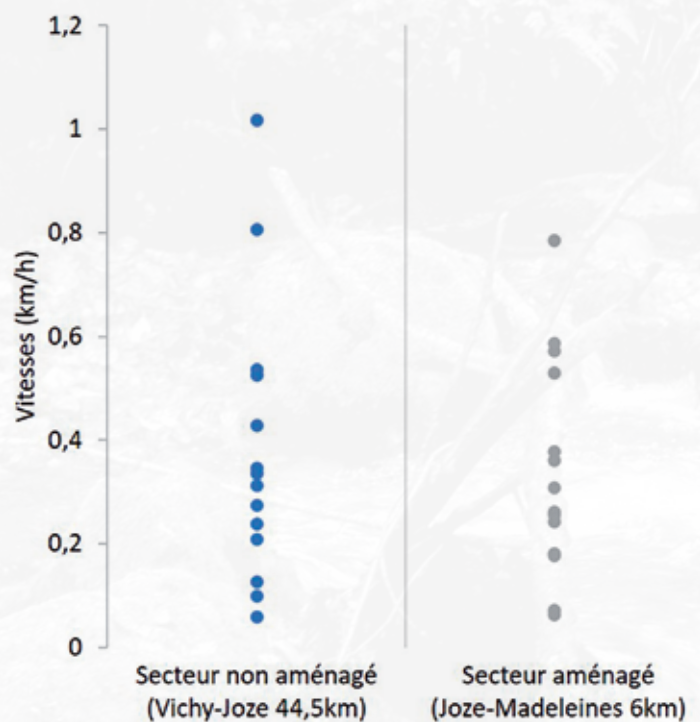


Figure 27 : Distribution des vitesses de migration individuelles obtenues sur le secteur aménagé et non aménagé pour les 14 saumons détectés.

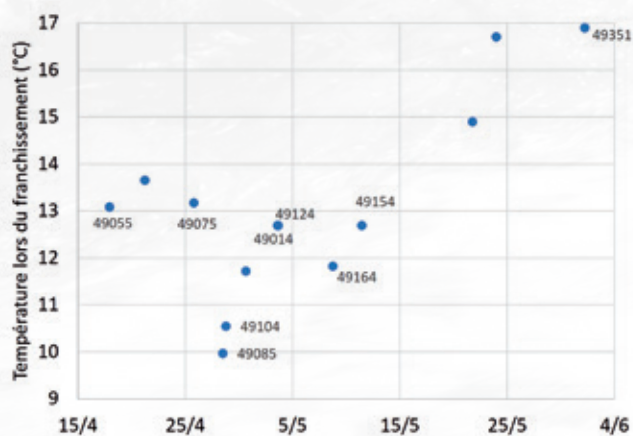
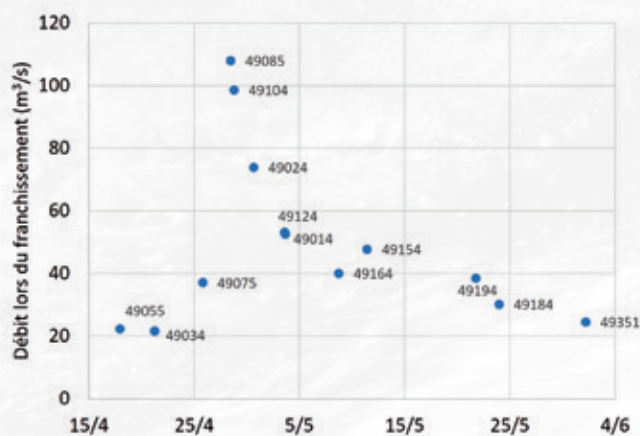


Figure 28 : Conditions de débit et de température observées lors des 13 franchissements observés au seuil A89.

Concernant les températures, les franchissements ont été observés à des valeurs comprises entre 10 et 17°C. Ces résultats confirment les données rapportées dans la littérature qui indiquent un ralentissement significatif de la migration au-delà de 18°C (Figure 28) : 70% des franchissements ont eu lieu à des températures inférieures à 14°C.

### CONCLUSIONS ET RÉPONSES APPORTÉES PAR L'ÉTUDE

Malgré des conditions hydro climatiques et un effectif migrant peu favorable, il a été possible de répondre aux objectifs du projet en termes de nombre de saumons marqués, mais également en termes de représentativité du lot marqué en rapport au lot migrant total.

Ce suivi a parallèlement exigé de relever plusieurs défis techniques avec notamment l'installation de 4 stations fixes isolées en milieu naturel, une forte exposition au risque de vandalisme et une exigence dans la couverture des zones de détection pour le seuil A89.

Le suivi radiopistage des 24 saumons en 2019 aura été marqué par une hydrologie globalement faible, hydrologie intéressante vis-à-vis des objectifs du suivi puisqu'elle a permis d'évaluer les franchissements du seuil A89 dans des conditions limitantes. Les températures sont conformes aux conditions moyennes aujourd'hui rencontrées par les saumons.

Les résultats de ce suivi s'inscrivent dans un contexte local singulier qu'il convient de bien appréhender lors de l'interprétation. Ce contexte est caractérisé en premier lieu par un fort éloignement à la mer de la zone d'étude (les saumons piégés ont déjà consommé beaucoup d'énergie pour la migration, leur état sanitaire externe est dégradé et s'explique en partie par le long périple déjà effectué). Cette singularité tient également à la localisation de la station de

piégeage/marquage sur le bassin Allier. La station de Vichy est en effet située dans un secteur de plaines, marqué par une augmentation rapide des températures de l'eau printanières. Les marquages des saumons sont ainsi réalisés dans une fourchette haute des températures de confort de l'espèce et ils sont en plus relâchés dans une retenue d'ouvrage (remous liquide supérieur à 5 km linéaire), accentuant potentiellement l'effet déroutage lié aux manipulations. Enfin, on relèvera que le système de piégeage de Vichy n'est pas optimal en termes d'efficacité. Il provoque chez certains saumons une hésitation marquée et par conséquent de nombreux allers-retours, augmentant l'effet retard induit classiquement par ce type d'ouvrage.

Sur les 24 saumons marqués, 14 ont migré sur l'ensemble de la zone d'étude et permettent donc une analyse du franchissement des ouvrages. En ce qui concerne le seuil A89, 13 individus ont été détectés et ont franchi l'ouvrage.

Ainsi, les vitesses moyennes de franchissement estimées pour le seuil A89 ne révèlent pas d'effet retard, apportant ainsi des éléments de réponse clairs vis-à-vis de l'obligation réglementaire (cf. réduction de l'effet retard). Il n'a pas été détecté de blocage en pied de l'ouvrage.

Le même constat a pu être établi en comparant les vitesses entre le secteur aménagé (environ 10 km linéaires) et le secteur non aménagé (environ 50 km linéaires).

Au-delà des moyennes, ce suivi a, classiquement, mis en évidence différents patterns comportementaux. La variabilité de ces patterns s'est exprimée autant entre secteurs aménagés/non-aménagés qu'au sein du lot d'individus marqués. Si cette variabilité montre que tous les saumons ne négocient pas le franchissement du seuil A89 de la même façon, elle ne remet pas en question les conclusions du suivi sur la suppression de l'effet retard post-aménagement. En termes de continuité longitudinale stricte,

et sur le secteur étudié, les résultats du suivi radiopistage 2019 semblent montrer des conditions de migration favorables pour le saumon, sans effet retard notable des ouvrages transversaux étudiés (au-delà des singularités comportementales de certains individus).

Les remerciements s'adressent à la DDT du Puy-de-Dôme, DDT de l'Allier, OFB direction interrégionale et pôle écohydraulique, DREAL de Bassin, CNSS, APS, CEN Auvergne, ASA de l'Artière et camping Beau Rivage.

### BIBLIOGRAPHIE CITÉE

1. Bach J, Lelievre M, Trotet M. Evaluation de la libre circulation sur l'axe Loire Allier. Suivi par radiopistage de la migration anadrome du saumon atlantique en 2006. Rapport LOGRAMI. 2008;
2. Bach J, Baisez A, Leon C, Parouty T. Suivi de la migration du saumon sur l'Allier par radiopistage entre Vichy et les zones de frayères en 2009. Rapport LOGRAMI. 2011;
3. Baisez A, Bach J-M, Leon C, Parouty T, Terrade R, Hoffmann M, et al. Migration delays and mortality of adult Atlantic salmon *Salmo salar* en route to spawning grounds on the River Allier, France. *Endangered species research*. 2011;15(3):265-70.
4. SCIMABIO Interface. Evaluation du franchissement des aménagements du seuil A89 et des Madeleines sur la rivière Allier par le saumon Atlantique (63) - Suivi par radiotélémétrie, Rapport final. 2020 p. 51.
5. Baras E, Philippart JC. Application du radiopistage à l'étude éco-éthologique du barbeau fluvialtile (*Barbus barbus*): problèmes, stratégies et premiers résultats. *Cahiers d'Ethologie Appliquée*. 1989;9(4):467-94.
6. Thioulouse G. Le comportement du saumon: essai d'éthologie du saumon de l'Allier. Plein Air Service; 1972.
7. Shepard SL. Atlantic salmon spawning migrations in the Penobscot River, Maine: fishways, flows and high temperatures. 1995.



## ENCADRÉ EXPLICATIF N°2:

Les suivis par radiotélémétrie (ou radiopistage) reposent sur l'utilisation de marques actives émettant un signal radio, dont la fréquence varie de 30 à 200 MHz, qui sera détecté et enregistré au niveau d'un récepteur. Les émetteurs radio sont pourvus d'une batterie interne. Leur durée de vie est par conséquent limitée, variant de quelques semaines à plusieurs années selon les réglages et le type d'émetteur utilisé. Le marquage des poissons à l'aide d'émetteurs radio peut être réalisé de trois façons (Illustration 3) : par voie intra gastrique, apposé en externe sur le dos du poisson ou par implantation chirurgicale dans la cavité abdominale.



Illustration 3: Implantation d'émetteurs actifs par voie intragastrique (gauche), chirurgicale (au centre) et dorsale (droite).

Chaque émetteur est caractérisé par une fréquence propre (émetteur non codé) ou par un identifiant unique (émetteur codé), permettant l'identification des individus marqués se trouvant à portée (ou « range ») de détection des récepteurs.

Les récepteurs peuvent être équipés d'une ou plusieurs antennes aériennes ou immergées (Illustration 4). Ils peuvent être utilisés de manière automatique pour équiper une station de suivi fixe ou manuellement pour réaliser des prospections mobiles.

Les suivis télémétriques mobiles appelés aussi radio pistage peuvent être réalisés à pied, à partir d'une embarcation, d'un véhicule ou d'un avion.



Illustration 4: Exemples de dispositifs de suivis fixes et mobiles par télémétrie radio.

En pratique, le signal est détecté sous forme de « bips » sonores audibles par l'opérateur. Il est en général d'abord recherché avec une antenne non directionnelle puis, une fois le signal capté, avec une antenne directionnelle, permettant de déterminer la direction de la source du signal et d'estimer sa localisation avec un degré de précision variable par triangulation.

Les mouvements des individus marqués sont retracés à partir de leurs positions successives enregistrées à l'aide des stations fixes ou mobiles. Compte tenu des portées de détections importantes (jusqu'à plusieurs centaines de mètres), la télémétrie radio permet de suivre les déplacements de poissons à des échelles spatiales importantes. Elles trouvent notamment des applications dans l'étude des patrons de migration, de l'utilisation des habitats ou encore du franchissement d'ouvrages.



“ Il revient au gestionnaire de bien choisir le système le plus adapté aux questions scientifiques posées, mais aussi aux contraintes des sites/milieus. ”



### III. MÉTHODES APPLIQUÉES AUX SUIVIS DE RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE

#### INTRODUCTION ET CONTEXTE

« La continuité écologique garantit le passage des poissons et des sédiments à travers les cours d'eau et autres milieux aquatiques. Elle peut être interrompue par des obstacles tels que les barrages, qui ont pour conséquence de perturber le transit sédimentaire et la circulation des organismes aquatiques. En France, une politique stricte de restauration de la continuité écologique est mise en œuvre pour améliorer la situation, notamment par l'aménagement de certains ouvrages. » (Eaufrance.fr, le service public d'information sur l'eau, 2021)

La restauration de la continuité écologique implique très souvent de réaliser des suivis post aménagement des ouvrages qui permettent d'évaluer l'efficacité des mesures prises par les gestionnaires. Pour ce faire, plusieurs technologies et méthodes sont disponibles pour juger du niveau de restauration résultant de l'application de ces mesures. Il est d'ailleurs maintenant fortement préconisé de déployer ces méthodes avant et après rétablissement de la continuité pour mieux évaluer les gains biologiques.

Chacune de ces méthodes permet de répondre à des questions précises, en intégrant notamment différentes échelles spatio-temporelles. Dès lors, une bonne connaissance des conditions et des limites d'application de ces méthodes constitue un préalable indispensable à la définition des protocoles de suivis, qui se doivent d'être adaptés au site étudié, mais aussi aux enjeux écologiques et économiques du territoire.

Dans ce chapitre, nous proposons de présenter les méthodes qui peuvent être appliquées pour le suivi de la restauration écologique, principalement pour le milieu aquatique, même si certaines d'entre elles peuvent être également utilisées pour répondre à des questions spécifiques de la continuité terrestre. Les avantages/inconvénients de ces méthodes

seront précisées en fin de chapitre afin que le lecteur ait la capacité de cibler celle(s) adaptée(s) à son questionnement.

#### APPORT DE LA TÉLÉMÉTRIE PASSIVE OU RFID

La RFID (*Radio Frequency Identification*) est utilisée depuis le milieu des années 80' pour l'étude du comportement des populations animales ainsi que pour l'identification des animaux domestiques ou d'élevage (Smyth et Nebel 2013). Le principe consiste en une communication entre une puce électronique (appelée transpondeur ou PIT tag) implantée dans un animal et un lecteur-récepteur qui génère un champ magnétique basse fréquence (134.4 kHz) transitant dans une antenne (Figure 29). Lorsqu'un PIT tag se présente au voisinage de l'antenne en fonctionnement, il emmagasine l'énergie et la restitue sous forme d'un code alphanumérique individuel qui est capté par l'antenne et enregistré par le lecteur-récepteur. Chaque passage d'individu marqué est alors détecté, son identifiant individuel est enregistré, la donnée est horodatée puis envoyée sur un serveur distant (voir encadré explicatif du chapitre « Suivis par la technologie RFID »)

La RFID permet notamment de mesurer la fonctionnalité d'ouvrages de franchissement aménagés en rivière (passes à poissons, buses, rampes..., Figure 30) et plus largement d'évaluer la continuité écologique des cours d'eau dans lesquels la migration piscicole est susceptible d'être entravée par des seuils naturels ou des aménagements anthropiques difficilement franchissables. Installés dans des passes à poissons (Figure 31), les systèmes RFID vont renseigner sur l'efficacité de ces dispositifs, en apportant des informations quantitatives sur leur attractivité, leur accessibilité et leur franchissabilité, par espèce de poisson et par classe de tailles, ainsi que sur les temps

de franchissement. Dans le lit mineur des cours d'eau, l'application de cette technologie renseigne sur le comportement des poissons et la dynamique des populations soumises à différents facteurs de forçage (fragmentation, hydrologie, température, prévalence de maladies...). L'emploi des puces de 12 mm permet en outre de marquer des alevins ou des petites espèces de poissons dès 55 mm (Richard *et al.* 2013; Vatland et Caudron 2015). Des applications à d'autres groupes faunistiques, aquatiques ou terrestres, sont rendues possibles

par la miniaturisation des PIT tags. La RFID a été notamment utilisée avec succès pour évaluer la fonctionnalité de batrachoducs pour différentes espèces d'amphibiens, ou mesurer les déplacements de certains insectes (Testud *et al.* 2019). La détection est soit assurée par des antennes fixes, soit par des antennes mobiles déplacées par un opérateur, afin notamment de localiser les individus résidents et mieux caractériser la fraction migratrice de la population ainsi que les distances de déplacement. Le faible coût des PIT tags (environ 2€) et leur facilité

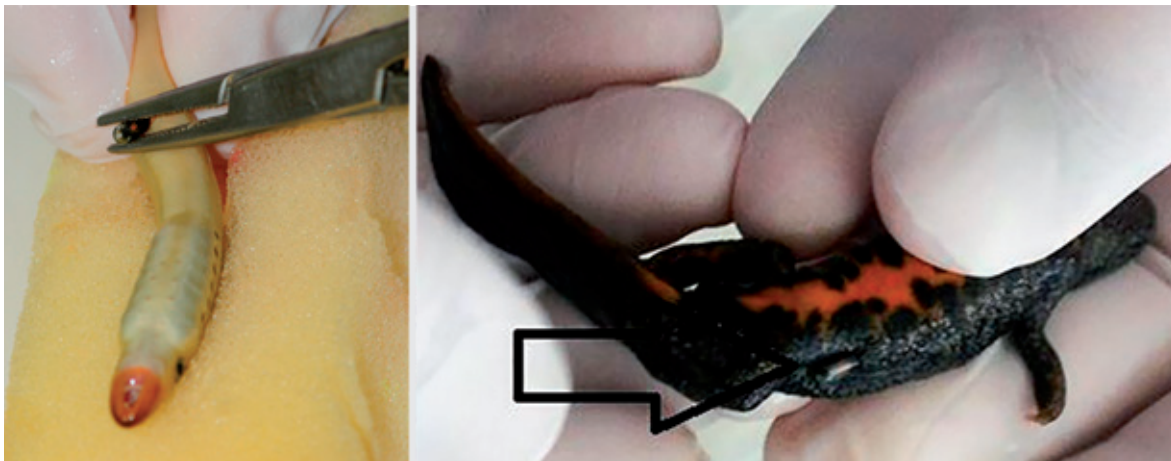


Figure 29 : Implantation de marque PIT tag 12 mm chez une lamproie de planer de 13cm (SCIMABIO Interface) et un triton de 10 cm (Weber et al. 2019).



Figure 30 : Exemples d'ouvrages dont la fonctionnalité peut être évaluée par RFID : batrachoduc (Testud et al. 2019), buse d'écoulement (étude SCIMABIO Interface pour ASF), passe à poissons (étude SCIMABIO Interface)





Figure 31 : Exemples de design d'antennes RFID installées dans différents environnements (Etudes SCIMABIO Interface, 2019-2021)

d'implantation permet d'envisager le marquage de plusieurs centaines d'individus, et d'assurer ainsi une bonne robustesse statistique des tendances observées à l'échelle de la population étudiée.

### APPORT DE LA TÉLÉMÉTRIE ACTIVE

À l'instar de la télémétrie RFID dite « passive », la télémétrie active est employée depuis le début des années 70' pour étudier les déplacements et le comportement d'animaux dans de grands milieux, qu'ils soient terrestres (forêts, corridors biologiques...) ou aquatiques (grands fleuves ou lacs) (DeCelles et Zemeckis 2014; North et Reynolds 1996; Julien Bergé 2012). Cette technologie se distingue cependant de la télémétrie passive par l'utilisation d'émetteurs actifs, c.-à-d. alimentés par une ou plusieurs batteries, (Figure 32) qui garantissent des portées de détection plus importantes (jusqu'à plusieurs kilomètres), mais de facto des durées de vie des émetteurs limitées (dépendantes de l'autonomie de la batterie).

On retrouve trois principales technologies lorsque l'on évoque la télémétrie active :

- La télémétrie acoustique : couramment utilisée dans tous les milieux aquatiques, qu'ils soient dulçaquicoles, marins et saumâtres, où le signal acoustique peut parcourir des distances relativement longues (< 1km). Les émetteurs fonctionnent en émettant une impulsion sonore dans les ultrasons, à une fréquence comprise entre 30 et ~300 kHz (Thorsteinsson 2002; Ehrenberg et Steig 2002), qui est détectée par un hydrophone ou récepteur acoustique. La distance à laquelle un émetteur peut être détecté dépend de sa puissance et de sa fréquence, ainsi que des caractéristiques de l'environnement. Le rayon de détection

d'un émetteur acoustique peut être affecté par un certain nombre de facteurs, tels que les propriétés physiques de l'eau, le réglage du système de détection ou encore la topographie du fond (Cotton 2010; J. Bergé *et al.* 2011).

- La radiotélémétrie est, quant à elle, préférée dans les environnements d'eau douce peu profonds, où les signaux radio sont capables de parcourir de plus grandes distances que les signaux acoustiques (Thorsteinsson 2002; Bain 2005). Les poissons sont équipés d'un émetteur radio et une antenne filaire qui émet le signal radio. Le signal radio se propage à travers les eaux peu profondes et dans les airs, où il peut être détecté par un récepteur basé à terre ou fixé sur un avion ou un bateau.
- La télémétrie GPS, technologie plus récente et complexe que les deux premières, est adaptée pour les très grands milieux (océans, grands lacs) qui ne peuvent être équipés avec des récepteurs conventionnels. Les émetteurs utilisés envoient la position de l'animal en utilisant le système satellitaire et impliquent, du fait leur taille et leur poids élevés, de travailler avec des animaux de grandes tailles. Cette technologie est par exemple utilisée pour le suivi de déplacement de grands animaux terrestres (pumas, ours...) (Wang, Smith, et Wilmers 2017; Baubet *et al.* 2004) ou aquatiques (baleines, requins...) (Trudelle 2016; Bonnin 2019).

Les systèmes de télémétrie active, spécialement les systèmes radio et acoustiques, peuvent être implantés au droit d'ouvrage entravant la continuité écologique, notamment piscicole, afin de qualifier et quantifier l'impact de l'obstacle sur le déplacement longitudinal des animaux étudiés (Figure 33). De la même manière, ces systèmes peuvent équiper des ouvrages

assainis (par suppression ou amélioration de leur fonctionnement) afin de vérifier leur bonne mise en transparence.

Généralement, on préférera utiliser ces technologies actives, plus coûteuses que le système passif RFID, lorsque la taille ou le nombre de voies de passage dans l'ouvrage sont conséquents ou lorsque l'on s'intéresse au déplacement d'animaux sur des linéaires

importants, c.-à-d. au-delà du strict champ d'interaction de l'aménagement sur le déplacement de l'animal.

Finalement, on retiendra que ces technologies actives permettent de répondre à des questions écologiques diverses et complémentaires de celles appréhendées par la technologie RFID et que leur utilisation nécessite une maîtrise plus importante de leur technologie ou de leurs limites

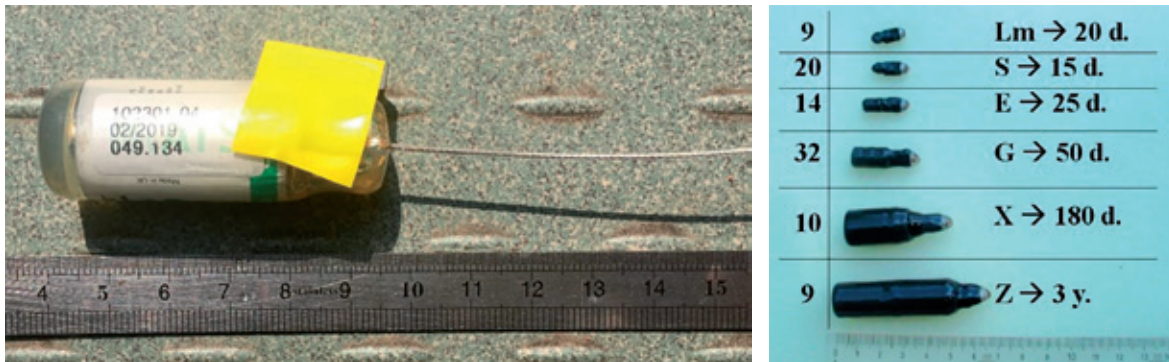


Figure 32: Exemples d'émetteurs utilisés par la télémétrie active: à gauche un émetteur ATS®, à droite des émetteurs HTI®.

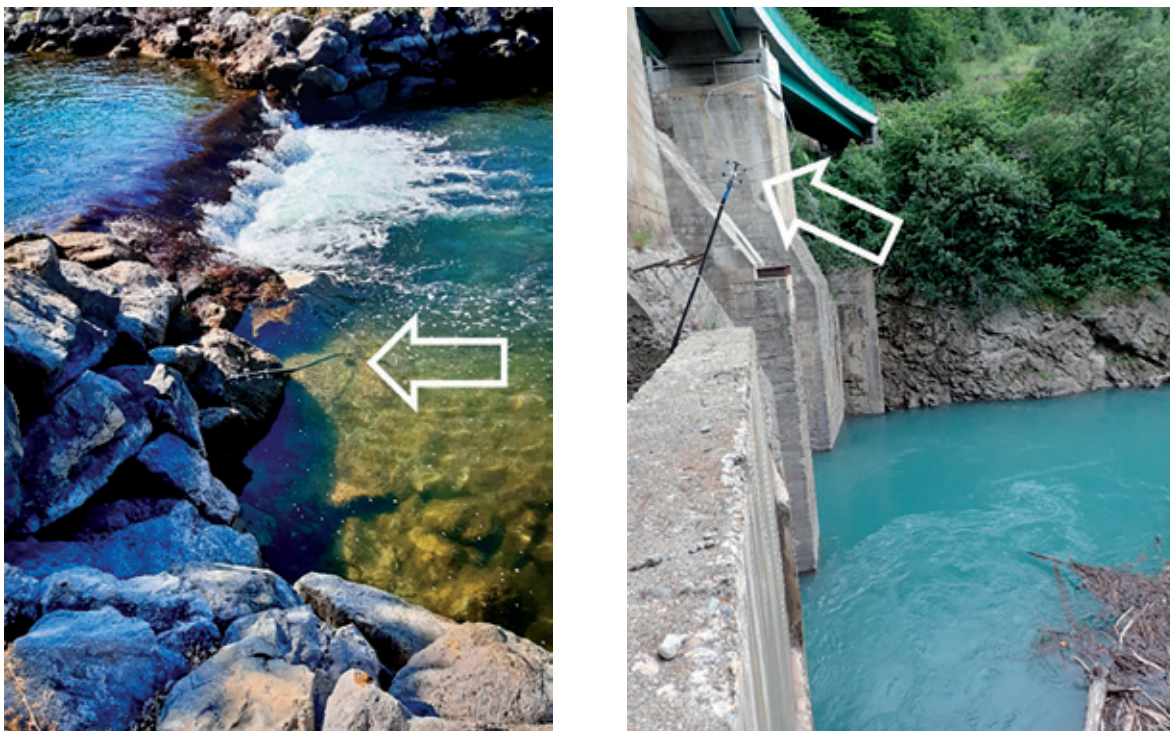


Figure 33: Exemples d'installation d'antennes télémétriques au droit d'obstacles à la continuité écologique. À gauche une antenne radio aquatique, à droite une antenne radio aérienne. (Etudes SCIMABIO Interface, 2014-2021).

de fonctionnement. En cela, la télémétrie, qu'elle soit active ou passive, nécessite l'intervention d'un personnel qualifié et formé à son bon emploi, afin d'optimiser la qualité des résultats écologiques escomptés.

Enfin, on notera que sur le plan réglementaire, le marquage de poissons avec des transpondeurs est soumis à l'arrêté interministériel du 1<sup>er</sup> février 2013 sur l'utilisation de la faune sauvage à des fins scientifiques. La législation impose trois choses :

- Les opérateurs doivent avoir suivi une formation vétérinaire spécifique ;
- L'organisme responsable du marquage doit être agréé comme « établissement utilisateur d'animaux à des fins scientifiques » ;
- Le protocole du projet doit être agréé par le ministère de la recherche après validation par un comité d'éthique en expérimentation animale.

### UTILISATION DE DISPOSITIFS DE VIDÉO-COMPTAGE

L'observation des flux migratoires piscicoles au sein des passes à poissons s'est développée en France dès le milieu des années 1980 afin d'obtenir des informations quantitatives sur les stocks de géniteurs d'espèces grande migratrice, comme le Saumon Atlantique (*Salmo salar L.*), sur de grands bassins hydrographiques comme la Loire, la Dordogne ou la Seine (Larinier *et al.* 1994). Des chambres de visualisation souterraines équipées de vitre latérale d'observation ont été développées à cet effet (Figure 34), de même que des solutions logicielles destinées à réduire le temps de traitement des enregistrements et basées sur des algorithmes de traitement d'images (Dartiguelongue 2020).

Avec la multiplication du nombre et surtout du type de passes à poissons implantées sur les rivières, les besoins relatifs aux applications de

l'outil vidéo-comptage ont fortement évolué depuis les années 2010. De nouvelles solutions matérielles ont vu le jour, celles-ci s'attachant à proposer des outils étanches, plus compacts et plus modulables afin de s'intégrer plus facilement aux ouvrages piscicoles, y compris ceux déjà existants (Figure 35). L'agencement des caméras, placées en vis-à-vis et en quinconce permet de filmer des hauteurs d'eau importantes malgré leur proximité au chenal de visualisation des poissons (Figure 36). L'amélioration continue des performances des outils informatiques et d'acquisition vidéo a parallèlement permis de progresser dans la qualité des images produites et d'optimiser les temps d'analyse, en particulière avec l'avènement de l'intelligence artificielle et des apprentissages profonds (Figure 37).

Aujourd'hui, les outils existants permettent de largement diversifier les opportunités d'utilisation du vidéo-comptage, et celui-ci n'est désormais plus réservé aux grands ouvrages présents sur les grands fleuves à poissons migrateurs. De nombreuses applications récentes ont démontré les capacités du vidéo-comptage à répondre à des questions opérationnelles comme l'évaluation de la franchissabilité des passes à poissons (Lambremon et Campton 2018), en particulier lorsque plusieurs dispositifs sont implantés en série sur un même cours d'eau, comme cela a été réalisé sur la Sèvre niortaise (Abdallah, Vigier, et Der Mikaélian 2020) ou sur la Somme.

Parallèlement, la qualité des images produites par les nouveaux outils permet d'acquérir des informations complémentaires précieuses telles que l'identification de petites espèces rares (comme l'Apron du Rhône, *Zingel asper*), la description de l'état sanitaire externe des poissons ou encore de procéder à une reconnaissance individuelle des poissons (par la singularité de leur livrée ou de signes

morphologiques particuliers). Enfin, ces images peuvent être utilisées à des fins de sensibilisation ou de communication afin de mieux faire connaître les peuplements de poissons vivant dans nos rivières et faisant l'objet d'actions destinées à les protéger (en premier lieu l'aménagement des ouvrages).

### UTILISATION D'OUTILS D'ANALYSE DE FLUX

Lorsque l'on étudie les peuplements piscicoles, la possibilité d'acquérir des données quantitatives a toujours constitué un défi technique. Il en est de même lorsqu'on s'intéresse à la franchissabilité d'un obstacle en rivière (barrage, seuil, buse, radier de pont...),

sujet au sein duquel la connaissance des flux de passages d'une espèce ou de plusieurs espèces est centrale. Le défi est d'autant plus important que les outils mobilisables pour acquérir cette connaissance ne doivent pas aboutir à un biais comportemental susceptible de fausser l'évaluation. Cet état de fait implique que les techniques de capture directes (par exemple au filet) ne peuvent être utilisées à cette fin.

Il a donc fallu développer d'autres outils, moins intrusifs, et faire appel à des technologies permettant d'observer et de comptabiliser un flux de passages sans avoir à manipuler les poissons (James 2016). Bien entendu, le fait de devoir agir sous l'eau ne facilite pas la tâche. Une des contraintes majeures rencontrées en subaquatique est la turbidité de l'eau,

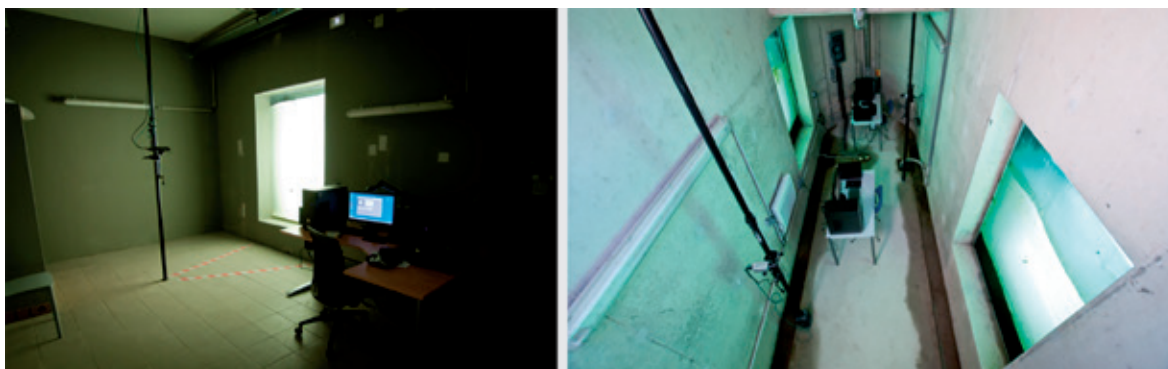


Figure 34 : À gauche : chambre de visualisation souterraine de Sauveterre sur le Rhône (Compagnie Nationale du Rhône). À droite : chambre de visualisation souterraine de Poses rive droite sur la Seine (Voies Navigables de France).

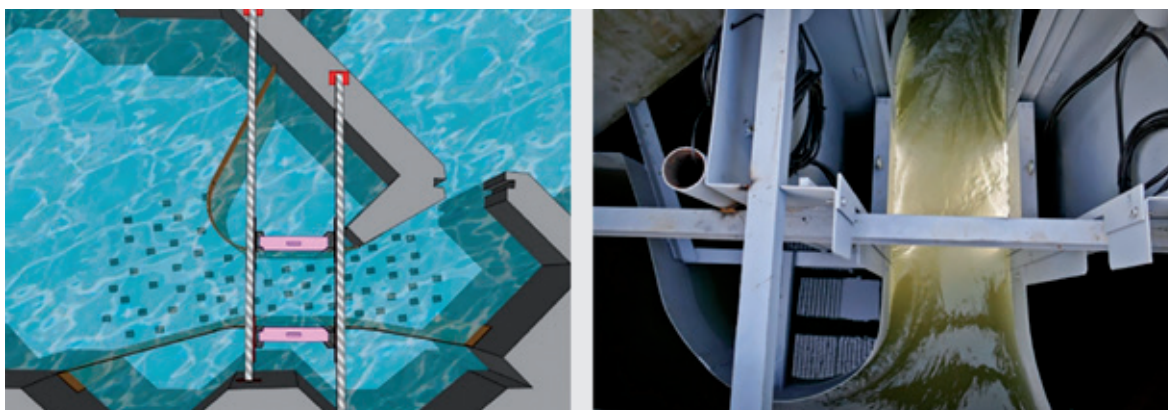


Figure 35 : Implantation d'un système de vidéo-comptage dans une passe à poissons existante. Utilisation de déflecteurs pleins pour assurer la qualité de l'entonnement hydraulique.

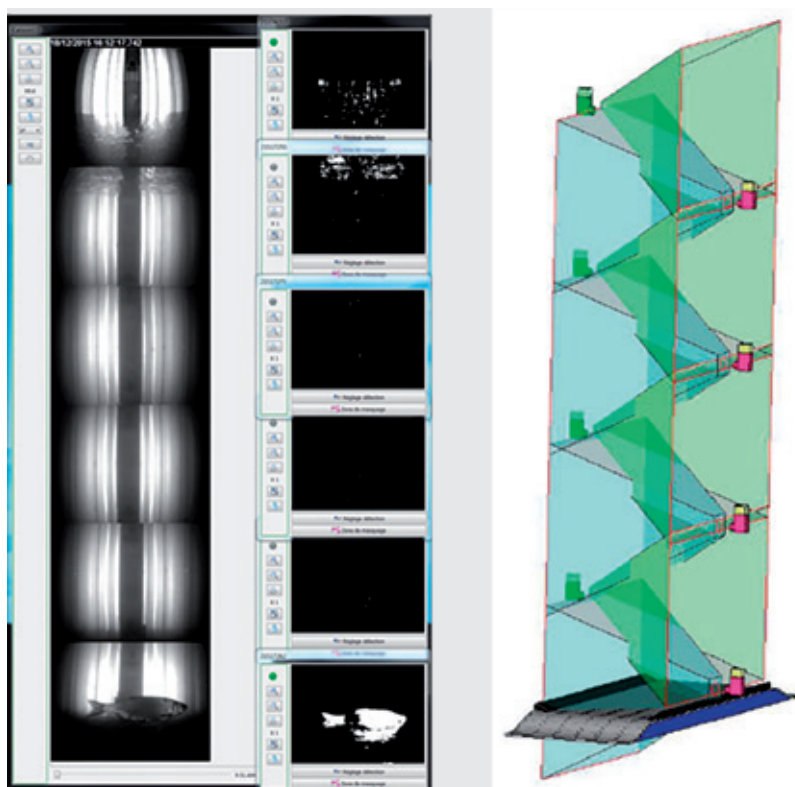


Figure 36 : À gauche : Image reconstituée à partir d'un système composé de 2 caissons en vis-à-vis équipés de 4 caméras placées en quinconce filmant une hauteur d'eau de 2.5 mètres. À droite : Projection 3D des champs de visualisation de chacune des 8 caméras.



Figure 37 : Illustrations d'images couleur issues d'une station de vidéo-comptage implantée sur la rivière Somme (SCIMABIO Interface - FDAAPPMA 80).

qui va en premier lieu fortement réduire les possibilités d'utilisation des caméras vidéo hors du contexte des passes à poissons. À partir de cette contrainte, il est possible de séparer les outils destinés à l'étude des flux piscicoles en deux groupes :

1. Les outils indifférents (ou très tolérables) à la turbidité et donc capables de travailler sur une profondeur de champ importante : les compteurs à résistivité, les sonars multifaisceaux et les caméras à imagerie acoustique ;
2. Les outils dont l'efficacité est directement liée à la turbidité et qui nécessitent par conséquent de réduire fortement la section de passage des poissons afin d'avoir la capacité de les comptabiliser et identifier : les caméras vidéo ainsi que les scanners infrarouges (voir partie vidéo-comptage).

Parmi les outils du groupe 1, les caméras acoustiques sont celles qui offrent aujourd'hui le plus grand potentiel d'utilisation pour le comptage de flux piscicoles en rivière (Figure 38). En effet, les compteurs à résistivité, dont le principe de fonctionnement est basé sur la différence de conductivité entre l'eau et le poisson, ont montré leur limite d'application sur le terrain. Ces derniers impliquent la nécessité de contraindre le poisson à passer à proximité d'une succession d'électrodes (utilisation impossible en grande rivière) et ne permettent pas de discriminer les différentes espèces (Figure 39). Les sonars multifaisceaux sont intéressants pour obtenir des informations quantitatives en termes de biomasses toutes espèces confondues, notamment en grands fleuves ou en grands lacs (Figure 40). Ce matériel est coûteux à l'acquisition et la qualité des données générées pose des limites dans l'interprétation des données (notamment pour la reconnaissance des espèces).

Les caméras acoustiques doivent être immergées et positionnées latéralement par rapport à la zone d'observation des passages de poissons (Figure 41). Ces outils sont basés sur une technologie d'acquisition d'images qui permet de s'affranchir des problématiques de turbidité et de travailler sur une distance de plusieurs dizaines de mètres. Depuis les années 2010, des caméras dites à faisceaux multiples ont été mises sur le marché, permettant de pouvoir affiner le suivi des objets avec des notions de vitesse de déplacement, direction, trajectoires ... et donc de décrire des comportements (Martignac *et al.* 2015). Elles ont aussi vu augmenter leur fréquence, permettant une réflexion plus fine des ondes acoustiques et donc un meilleur rendu concernant la forme du corps des poissons, mais aussi la possibilité de mesurer des tailles d'objet. Aujourd'hui, les caméras les plus performantes du marché disposent d'une fréquence maximale de 3 MHz et offrent, dans certaines conditions, la possibilité d'observer simultanément du flux de passages et de discriminer les espèces présentes (Figure 42). Mais à haute fréquence, le champ de vision de la caméra se réduit de façon significative, ce qui pose d'importantes contraintes lorsque l'on veut acquérir des données exhaustives de flux de passages.

Les caméras à imagerie acoustique constituent donc aujourd'hui l'outil le plus performant pour obtenir des données quantitatives de passages de poissons, mais elles s'accompagnent encore de nombreuses limites : coût d'acquisition (plusieurs dizaines de milliers d'euros par unité), difficulté à identifier les espèces hors utilisation à haute fréquence, absence de logiciel de post-traitement des images (donc coût d'analyses très élevé). Des progrès technologiques sont attendus et devraient permettre à terme de démocratiser l'utilisation de ce type de caméras dans le cadre de suivis de la franchissabilité piscicole d'ouvrages transversaux.



Figure 38 : Exemples de caméras acoustiques utilisées pour les suivis de flux migratoires piscicoles. De gauche à droite, Oculus M1200d, Blue view M900-2250, Aris explorer 3000 Source : Soundmetrcs, Subsea.

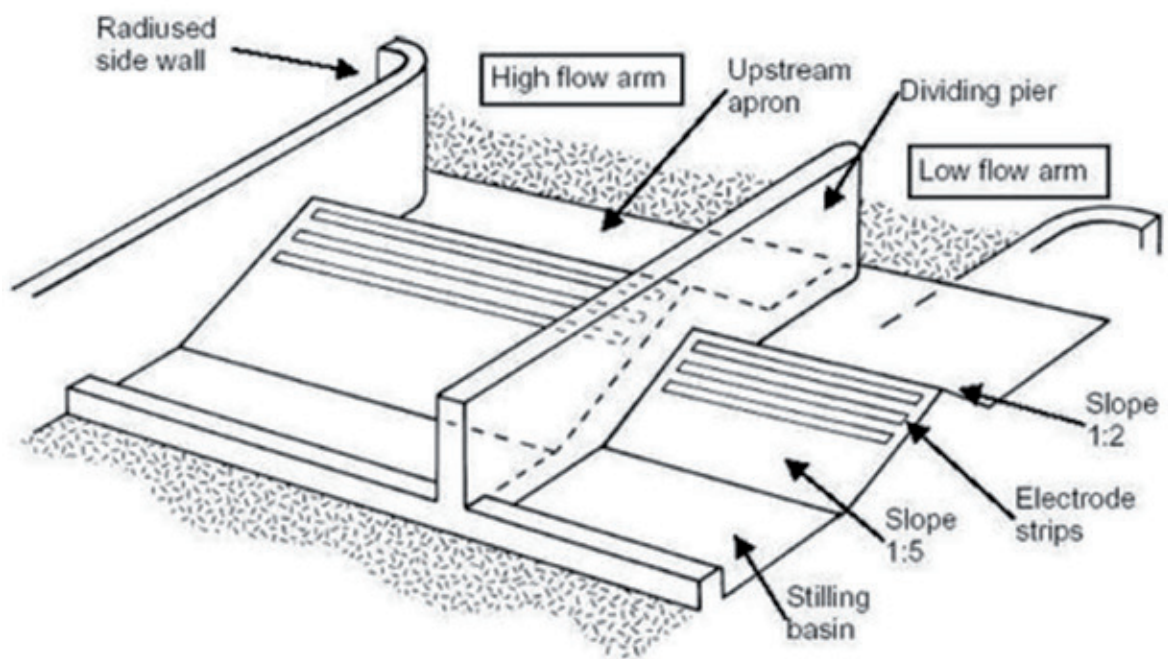


Figure 39 : Exemple de compteur à résistivité utilisé en rivière (Schéma : Loughs Agency (2016) ; Photo : InStream Fisheries Research).



## APPORT DE LA GÉNÉTIQUE DU PAYSAGE

Située à l'interface entre l'écologie du paysage et la génétique des populations, la génétique du paysage est une discipline récente visant à étudier l'influence des structures éco-paysagères sur la structuration spatiale de la variabilité génétique des populations. Elle repose sur l'analyse de génotypes multi locus (microsatellites, SNP) pour différents groupes d'individus échantillonnés sur un territoire donné. D'un point de vue théorique, chaque population est caractérisée par la collection et la fréquence des gènes qu'elle renferme. Lorsqu'une population n'est pas impactée par la présence d'obstacles (barrages, seuils, chutes d'eau...), les différents groupes d'individus analysés sur un territoire ont alors tendance à « se ressembler » sous l'effet du brassage génétique inter populationnelles (Figure 43). En revanche, l'absence de flux de gènes inhérente aux ruptures de connectivité implique que chaque population évolue indépendamment d'un point de vue génétique. Chaque groupe d'individus accumule alors des spécificités génétiques singulières : la présence d'obstacles à la mobilité piscicole est ainsi révélée par l'obtention de groupes génétiques distincts (Figure 43) (Raeymaekers *et al.* 2008; Neville, Dunham, et Peacock 2006; Torterotot *et al.* 2014).

En étudiant les populations existantes sur un territoire donné, les outils moléculaires offrent donc la possibilité d'évaluer les questions de migrations et de flux de gènes, facilitant l'identification d'éventuelles discontinuités génétiques existantes. Contrairement aux approches traditionnelles généralement basées sur l'évaluation ponctuelle des franchissements au niveau d'un ouvrage, les données génétiques offrent l'avantage d'apprécier l'incidence des obstacles sur le long terme. Elles constituent

donc une métrique intégratrice de la dynamique des populations au fil du temps, reflétant le fonctionnement biologique des populations et permettant l'identification précise des barrières à la mobilité piscicole.

## UTILISATION DE L'ADN ENVIRONNEMENTAL

L'ADN environnemental (ADNe) peut être défini comme l'ensemble de l'ADN que l'on peut extraire d'un échantillon prélevé dans l'environnement (e.g. sol, eau, sédiment). Appliquée aux milieux aquatiques, cette définition englobe à la fois l'ADN des organismes microscopiques vivants naturellement dans le milieu prélevé ainsi que l'ADN dit « libre » car relargué sous différentes formes par les micro et macro-organismes en contact étroit avec ce milieu (e.g. cellules mortes, fèces, gamètes...). À partir d'un simple échantillon environnemental (Figure 44), l'ADNe offre donc la possibilité d'étudier de manière non invasive et à large échelle une grande diversité de groupes biologiques parfois méconnus ou difficilement observables avec les approches traditionnelles (e.g. bactéries, diatomées, macro-invertébrés, poissons, petits mammifères aquatiques...).

Plusieurs approches de biologie moléculaire peuvent être utilisées pour l'analyse des prélèvements ADNe (Bruce *et al.* 2021), parmi lesquelles on retrouve fréquemment :

- Le « metabarcoding » qui cible une courte région d'ADN (ou « code barre » ADN) caractéristique de la communauté biologique étudiée. Les séquences ADN associées à cette région et présentes dans l'échantillon sont séquencées et comparées à une base de référence génétique qui permet l'identification des espèces et l'obtention d'un inventaire de diversité.
- Le suivi spécifique cible un court fragment d'ADN caractéristique d'une seule espèce,

permettant de valider précisément la présence ou l'absence de cette dernière dans l'échantillon étudié.

Appliquées aux problématiques de suivi de la continuité écologique des rivières, ces approches peuvent être déployées en parallèle pour répondre à des questions de gestion et de conservation. Le metabarcoding ADN appliqué aux communautés de poissons peut permettre d'évaluer la richesse spécifique sur différentes sections de la rivière et mesurer l'effet de la suppression d'ouvrages sur les communautés

(Muha *et al.* 2021). Si l'approche cible un groupe bioindicateur comme les diatomées (Vasselon *et al.* 2019), il est possible d'évaluer l'impact d'une action de restauration sur l'état écologique du cours d'eau. Le suivi spécifique par ADN d'une espèce d'intérêt communautaire, comme l'alse feinte (*Alosa fallax L.*, poisson migrateur) par exemple, renseigne sur l'étendue spatiale et temporelle des migrations de reproduction, ainsi que sur la franchissabilité des ouvrages à l'échelle d'un bassin versant (Antognazza *et al.* 2021).

Bien qu'en plein développement, les approches

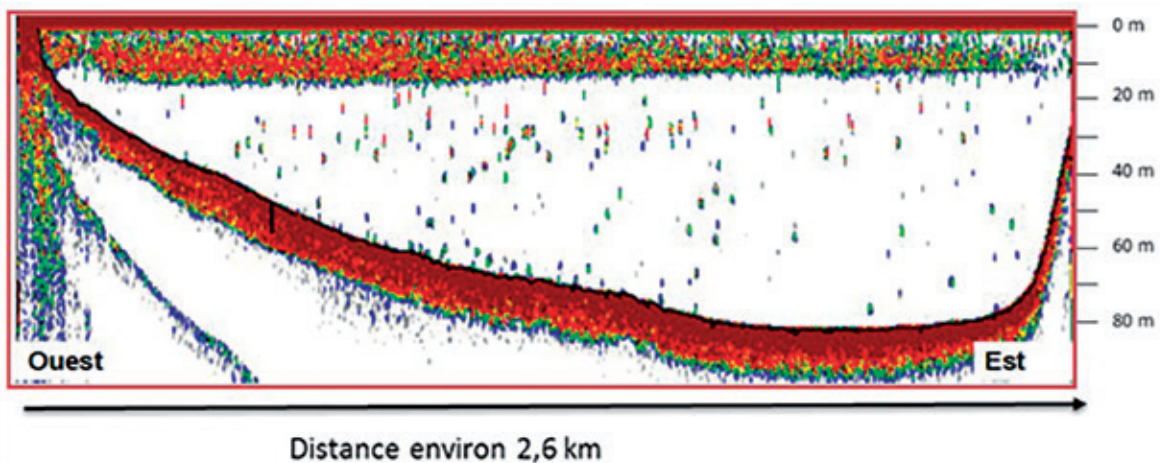


Figure 40 : Exemple d'un transect d'échosondage sur le lac d'Annecy réalisé au sonar multifaisceaux. Les très fortes densités d'échos dans les couches supérieures correspondent à de perches juvéniles (Guillard 2016).

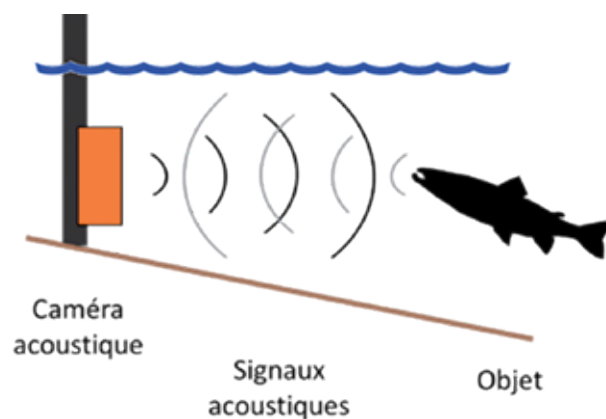


Figure 41 : Fonctionnement et positionnement théorique d'une caméra acoustique en rivière (Abdallah, Robert, et Rimbart 2020).

basées sur l'ADNe offrent déjà des outils opérationnels en appui à la gestion et à la conservation des milieux aquatiques. Les évolutions techniques à venir ainsi que les actions de transfert des méthodes de la science vers la gestion devraient faciliter leur opérationnalité et accessibilité aux gestionnaires dans les prochaines années.

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il existe une multitude de systèmes et de technologies permettant d'appréhender la continuité écologique, qu'elle soit terrestre ou aquatique, animale ou minérale. Aujourd'hui, les avancées techniques et scientifiques (R&D) miniaturisent, optimisent, simplifient

et fiabilisent des outils, jusqu'à récemment réservés à des utilisateurs spécialisés.

Il revient au gestionnaire, ou à l'utilisateur final, de bien choisir le système le plus adapté aux questions scientifiques posées, mais aussi aux contraintes des sites/milieux qui favorisent l'un ou l'autre des systèmes décrits dans ce chapitre. Afin d'aider au mieux le lecteur dans sa réflexion s'il venait à devoir réfléchir un suivi écologique de la continuité, nous proposons ci-après un tableau de synthèse (Tableau 2) décrivant les avantages/inconvénients, mais aussi les limites de fonctionnement des systèmes décrits dans ce document.

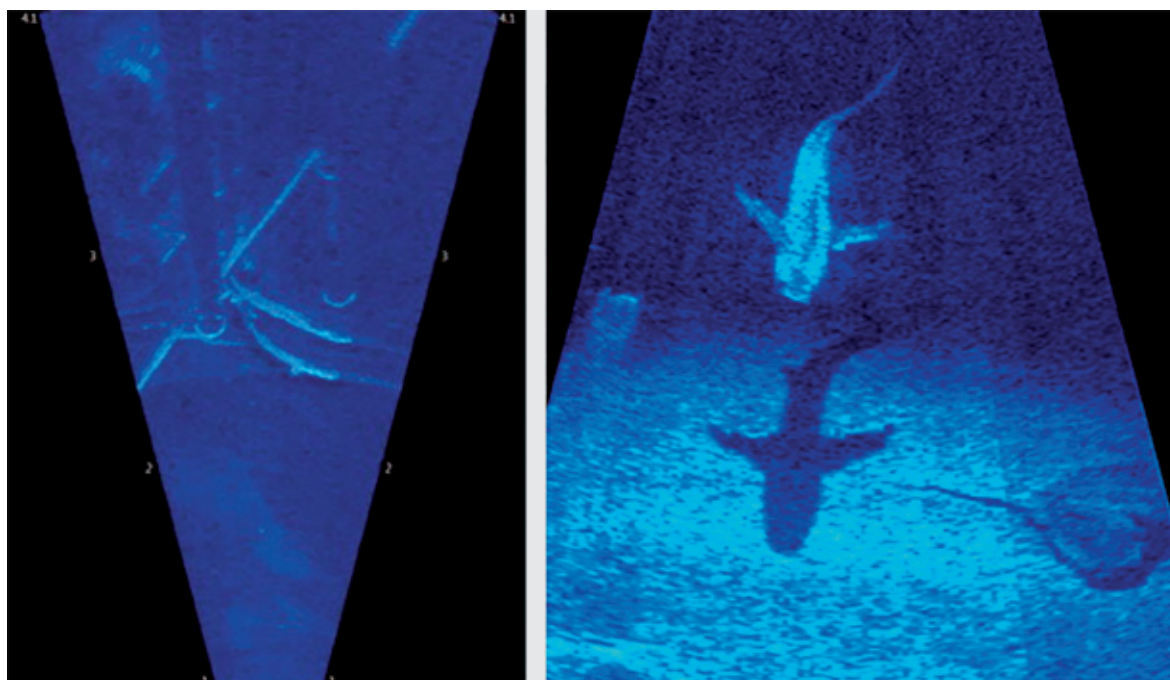


Figure 42: Illustration de la qualité des images fournies par une caméra ARIS Explorer utilisée à haute fréquence 3.0 MHz (Source : Soundmetrics).

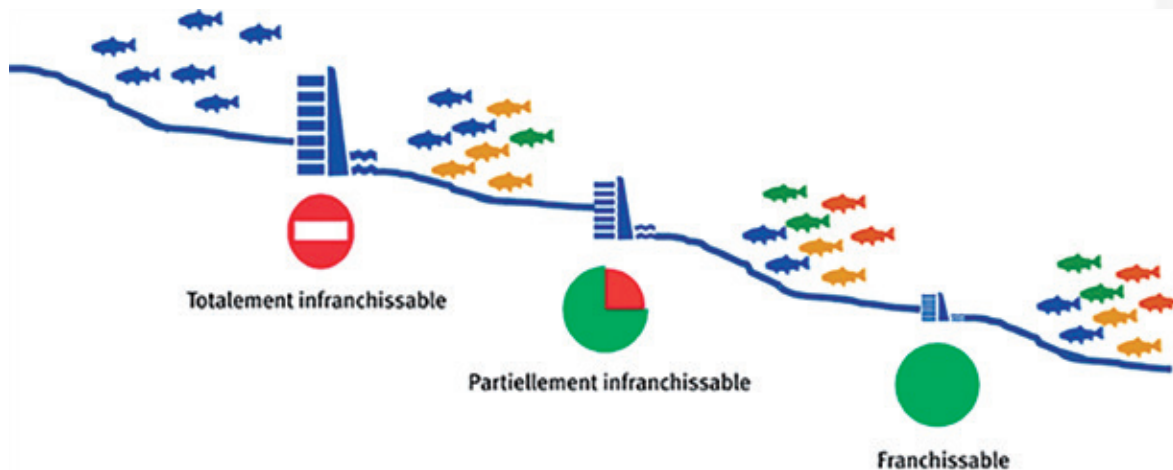


Figure 43 : Illustration des conséquences génétiques de la fragmentation des habitats (source : Revue Science Eaux & Territoires, Trame verte et bleue numéro 25, 2018) (Torterotot et Caudron 2018).

Technologie	Informations recueillies	Coût	Inconvénients
<b>Télémétrie passive</b>	Présence / Absence Identification individuelle Comportement Sens du passage (si 2 antennes) Temps de déplacement (si 2 antennes)	-	Sensibilité du système Nécessite des compétences techniques accrues Nécessité de capturer les animaux pour marquage
<b>Télémétrie active</b>	Présence / Absence Identification individuelle Comportement Étude poussée de la mobilité	++	Coût du matériel, notamment des émetteurs Nécessite des compétences techniques accrues Nécessité de capturer les animaux pour marquage
<b>Dispositif de vidéo-comptage</b>	Présence / Absence Spéciation Comptabilisation du nombre d'individus État sanitaire Identification individuelle (plus rare)	++	Adaptabilité du système Nécessite une expertise technique très poussée Temps de dépouillement des images
<b>Outils d'analyse de flux</b>	Évaluation quantitative et semi-quantitative Données de vitesse, trajectoire et direction Identification individuelle (rare)	++	Nécessite une expertise technique très poussée Analyses des données complexes
<b>Génétique du paysage</b>	Proximité génétique entre groupe d'individus Évaluation du patrimoine génétique	-	Méthode invasive (prélèvement de tissus) Analyses des données complexes
<b>ADN environnemental</b>	Présence / absence Spéciation (espèce ou groupe)	-- ++	Nécessite une expertise technique très poussée Analyses des données complexes Peut vite devenir couteux en fonction du design

Tableau 2 : Technologies de suivis de la continuité disponibles : avantages/inconvénients et autres détails.

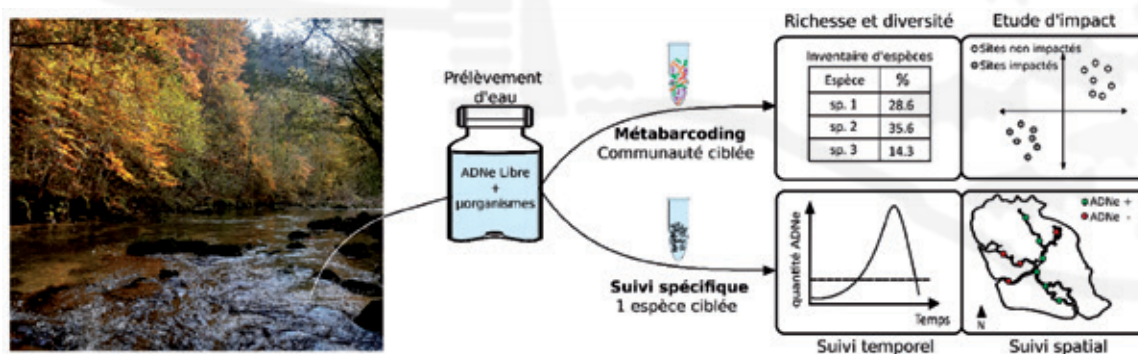


Figure 44 : Schéma de principe de l'utilisation de l'ADNe comme outil de suivi de la restauration de la continuité écologique.

Avantages	Recommandations	
	Ind. à marquer ou n échantillon	Durée minimale d'un suivi
Adaptabilité du système Coût des émetteurs réduits Diversité des questions écologiques abordées	Min. 100 par étude et par année	1 an (1 cycle vital)
Adaptabilité du système Diversité des questions écologiques abordées Utilisable sur tous types de milieux	Min. 30 par étude et par année	1 an (1 cycle vital)
Aucune capture préalable d'animaux Quantification d'un flux de passage : données très difficiles à obtenir Prise de vue des animaux	-	2 an (2 cycle vitaux)
Aucune capture préalable d'animaux Adaptabilité du système Quantification d'un flux de passage : données très difficiles à obtenir	-	2 an (2 cycle vitaux)
Haute résolution spatiale et temporelle Identification des populations Identification de barrières à la mobilité	Min. 40/station	1 an
Aucune capture préalable d'animaux Adaptabilité du système Inventaire de diversité facile à réaliser Détection fine d'espèce d'intérêt (invasive, rare...) Suivis spatio-temporels accessibles grâce à la facilité de l'échantillonnage	Min. 1 échantillon/station à ajuster en fonction de l'objectif	1 an

## RÉFÉRENCES CITÉES

1. Abdallah, Yann, Michel Robert, et Lény Rimbart. 2020. « Etude avant-projet pour la mise en place d'une station de comptage « migrants » (STACOMI) sur le fleuve Léguer. FDAAPPMA 22 – SCIMABIO Interface ». FDAAPPMA 22 – SCIMABIO Interface.
2. Abdallah, Yann, Laure Vigier, et S. Der Mikaélian. 2020. « Suivi de la migration 2019 et 2020 des aloses par vidéo-comptage sur la Sèvre niortaise au niveau de la passe à poissons du barrage de la Sotterie (79) ». PNR Marais Poitevin – SCIMABIO Interface.
3. Antognazza, Caterina Maria, J Robert Britton, Vanessa De Santis, Konstantina Kolia, Ossi A Turunen, Peter Davies, Laura Allen, Emilie A Hardouin, Charles Crundwell, et Demetra Andreou. 2021. « Environmental DNA reveals the temporal and spatial extent of spawning migrations of European shad in a highly fragmented river basin ». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*.
4. Bain, Mark B. 2005. « Electronic tags ». In *Stock Identification Methods*, 435-46. Elsevier.
5. Baubet, Eric, Serge Brandt, Jacques Vassant, Jean-Paul Gendner, et François Klein. 2004. « Can wild boar be surveyed using GPS? »
6. Bergé, J., C. Capra, H. Pella, T. W. Steig, M. Ovidio, E. Bultel, et N. Lamouroux. 2011. « Probability of detection and positioning error of a hydro acoustic telemetry system in a fast-flowing river: intrinsic and environmental determinants ». *Fisheries Research*.
7. Bergé, Julien. 2012. « Apport de la télémétrie acoustique pour la compréhension de l'utilisation dynamique des habitats par les poissons dans un grand fleuve aménagé, le Rhône ». Université Claude Bernard-Lyon I.
8. Bonnin, Lucas. 2019. « Apports de la télémétrie acoustique pour améliorer la conservation du requin gris de récif, *Carcharhinus amblyrhynchos* ».
9. Bruce, K., R.C. Blackman, S.J. Bourlat, M. Hellstrom, J. Bakker, I. Bista, K. Bohmann, et al. 2021. A practical guide to DNA-based methods for biodiversity assessment. Submitted to Pensoft as virtual eBooks.
10. Cotton, Charles F. 2010. « Factors affecting reception range of ultrasonic tags in a Georgia estuary ». *Marine Technology Society Journal* 44 (5): 17-24.
11. Dartiguelongue, J. 2020. « Guide pour la conception d'une station de vidéocontrôle dans une passe à poissons. L'expérience française: critères, matériels et pratiques. Rome, FAO. »
12. DeCelles, Greg, et Doug Zemeckis. 2014. « Acoustic and radio telemetry ». In *Stock identification methods*, 397-428. Elsevier.
13. Ehrenberg, J. E., et T. W. Steig. 2002. « A method for estimating the "position accuracy" of acoustic fish tags ». *ICES Journal of Marine Science* 59 (1): 140-49.
14. Guillard, Jean. 2016. « L'acoustique au service de l'écologie halieutique ». *Traitement du signal*.
15. James, Orpwood. 2016. « Technical, logistical, and economic considerations for the development and implementation of a Scottish salmon counter network ».
16. Lambremon, J., et P. Campton. 2018. « Suivi vidéo de la passe à poissons du Pouzin sur le Rhône. Rapport final. » Association Migrateurs Rhône-Méditerranée.
17. Larinier, Michel, JP Porcher, F Travade, et Claude Gosset. 1994. « Passes à poissons: expertise, conception des ouvrages de franchissement ». In. CSP.
18. Martignac, François, Aurélie Daroux, Jean-Luc Bagliniere, Dominique Ombredane, et Jean Guillard. 2015. « The use of acoustic cameras in shallow waters: new hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology ». *Fish and fisheries* 16 (3): 486-510.

19. Muha, Teja P, Deiene Rodriguez-Barreto, Richard O'Rorke, Carlos Garcia de Leaniz, et Sofia Consuegra. 2021. «Using eDNA metabarcoding to monitor changes in fish community composition after barrier removal ». *Frontiers in Ecology and Evolution* 9: 28.
20. Neville, Helen M, Jason B Dunham, et Mary M Peacock. 2006. « Landscape attributes and life history variability shape genetic structure of trout populations in a stream network ». *Landscape Ecology* 21 (6): 901-16.
21. North, Malcolm P, et Joel H Reynolds. 1996. « Microhabitat analysis using radiotelemetry locations and polytomous logistic regression ». *The Journal of wildlife management*, 639-53.
22. Raeymaekers, Joost AM, Gregory E Maes, Sarah Geldof, Ingrid Hontis, Kris Nackaerts, et Filip AM Volckaert. 2008. « Modeling genetic connectivity in sticklebacks as a guideline for river restoration ». *Evolutionary applications* 1 (3): 475-88.
23. 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.
24. Smyth, Brian, et Silke Nebel. 2013. « Passive integrated transponder (PIT) tags in the study of animal movement ». *Nature Education Knowledge* 4 (3): 3.
25. Testud, Guillaume, Alan Vergnes, Philippe Cordier, Dorothée Labarraque, et Claude Miaud. 2019. «Automatic detection of small PIT-tagged animals using wildlife crossings ». *Animal Biotelemetry* 7 (1): 1-9.
26. Thorsteinsson, V. 2002. « Tagging methods for stock assessment and research in fisheries ». *Report of concerted action FAIR CT 96*: 179.
27. Torterotot, Jean-Baptiste, et Arnaud Caudron. 2018. « Quel potentiel des outils génétiques pour étudier le rétablissement de la connectivité des habitats piscicoles? » *Sciences Eaux Territoires*, no 1: 62-67.
28. Torterotot, Jean-Baptiste, Charles Perrier, Normand E Bergeron, et Louis Bernatchez. 2014. «Influence of forest road culverts and waterfalls on the fine-scale distribution of brook trout genetic diversity in a boreal watershed ». *Transactions of the American Fisheries Society* 143 (6): 1577-91.
29. Trudelle, Laurène. 2016. « Distribution et préférences d'habitats des baleines à bosse de l'hémisphère Sud en période de reproduction ».
30. Vasselon, V, F Rimet, I Domaizon, O Monnier, Y Reyjol, et A Bouchez. 2019. « Évaluer la pollution des milieux aquatiques avec l'ADN des diatomées: où en sommes-nous? » *Techniques Sciences Méthodes*, no 5: 53-70.
31. Vatland, Shane, et Arnaud Caudron. 2015. « Movement and early survival of age-0 brown trout ». *Freshwater biology* 60 (7): 1252-62.
32. Wang, Yiwei, Justine A Smith, et Christopher C Wilmers. 2017. « Residential development alters behavior, movement, and energetics in an apex predator, the puma ». *PloS one* 12 (10): e0184687.
33. Weber, Lukáš, Marek Šmejkal, Daniel Bartoň, et Martin Rulík. 2019. « Testing the applicability of tagging the Great crested newt (*Triturus cristatus*) using passive integrated transponders ». *PloS one* 14 (7): e0219069.

**VINCI Autoroutes**

Direction Technique de l'Infrastructure  
74, allée de Beauport  
84278 Vedène cedex  
Tél. : +33 4 90 32 73 54  
Fax. : +33 4 90 32 91 08