

Évaluation de l'efficacité de la barrière immergée et de la passe à poissons du barrage de Weweler sur l'Our.



Rapport final

Pour le compte de :
Direction des Cours d'Eau Non Navigables
Avenue Prince de Liège 7, 5100 Jambes
Marchés de service n°03.06.04-18J07

Auteurs : Colson, D.¹ ; Sonny, D.¹ ; Ovidio, M.² & Benitez, J.P.²

¹Profish Technology – Chemin des Pêcheurs 114, 5100 Jambes

²Université de Liège – UR FOCUS-Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et
Aquaculture - Laboratoire de Démographie des Poissons et Hydroécologie – Quai Van
Beneden 22, 4020 Liège.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Matériels et méthodes	4
2.1 Site d'étude	4
2.2 Technique de télémétrie : la radio-télémétrie	6
2.3 Principe d'installation	6
2.4 Dispositif radio sur le site du Weweler	7
2.4.1 Vue générale	7
2.4.2 Antenne entrée système (ES)	7
2.4.3. Antenne aval Barrage (AB)	8
2.4.4 Antenne sortie Barrage (SB)	8
2.4.5 Antenne entrée de passe (EP)	9
2.4.6 Antenne sortie de passe (SP)	9
2.4.7 Récepteurs radio et matériel annexe	9
2.4.8 Zones de détections	10
2.5 Variables comportementales et temporelles	11
2.6 Capture, marquage et déversement des poissons sur l'Our	12
2.7 Biométrie des poissons capturés et marqués	14
2.8 Relevé des paramètres physiques	15
2.8.1 Température	15
2.8.2 Débit total (Q_{total})	15
2.8.3 Débit turbiné (Q_t)	15
2.8.4 Paramètres de franchissabilité de la barrière immergée	16
2.9 Télémétrie mobile	18
3. Résultats	18
3.1 Évaluation physique de la franchissabilité de la barrière immergée	18
3.2 Bilan des détections	19
3.2.1 Répartition des détections	19
3.2.2 Comparaison des individus détectés et non détectés	20
3.3 Patrons de mobilité	20
3.5 Attractivité et efficacité de la passe à poisson	23
3.6 Franchissabilité de la barrière immergée	26
4. Discussions	30
4.1 Fiabilité des antennes	30
4.2 Bilan des détections	30
4.3 Barrière immergée : capacité de répulsion	31
4.4 Données pour la passe à poissons	32
5. Conclusions et recommandations	33
6. Références	34
7. Annexes	36

1.Introduction

Une grande attention a été accordée aux effets de blocage des obstacles sur la migration des poissons diadromes (Piper et al., 2012) et lorsque les conditions locales ou sociétales le permettent, certains barrages sont supprimés (Gregory et al., 2002; Garcia de Leaniz, 2008). Néanmoins, les éliminations d'obstacles sont généralement impossibles, et des dispositifs de franchissement sont construits de manière à permettre le mouvement des poissons (Silva et al., 2018). Une grande variété de dispositifs ont été construits pour faciliter le mouvement des poissons et d'autres organismes tels que les crustacés devant les barrages (Clay 1995, Silva et al.2018). Les premiers efforts pour faciliter un passage au droit des barrages, se sont concentrés sur des poissons commerciaux et récréatifs de grande valeur comme le saumon et la truite, mais les efforts se sont élargis pour inclure le passage de l'ensemble de la communauté piscicole (Lucas et Baras, 2001; Benitez et al. , 2015). Néanmoins chaque site reste unique et peut s'avérer complexe en termes de voies de passage. En effet, certaines centrales hydroélectriques créent, par le biais des rejets de turbines, une voie de migration alternative pour les poissons lors de montaison. Ce canal de fuite peut parfois constituer une voie sans issue et engendrer un retard conséquent dans la migration.

Dans ce contexte, dans le bassin de l'Our, une barrière immergée a été installée par la DCENN en aval du canal de fuite de la centrale hydro-électrique (CHE) du Weweler-Mühle, installée dans la commune de Burg-Reuland. Cette barrière a pour but de réduire l'attractivité générée par le canal de fuite de la centrale et de maintenir les poissons en migration dans le cours d'eau principal qui débouche sur une passe à poissons et dont le débit réservé fait l'objet d'une règle spécifique. Cette étude a donc pour objectif premier d'évaluer l'efficacité de cette barrière et dans un second temps, de mesurer la franchissabilité de la passe à poissons de montaison, associée à cette CHE.

Ce suivi devrait permettre à la DCENN de valider l'utilisation de barrières immergées afin d'améliorer l'attractivité des passes dans un contexte comparable et si nécessaire de revoir la conception de ce type de structure afin d'optimiser l'efficacité du dispositif de répulsion vers une voie de migration sans issue.

Le suivi proposé a été réalisé par télémétrie radio. La méthode consiste à capturer des poissons en amont de l'obstacle, à les équiper d'émetteurs radio, puis de les déverser en aval de l'obstacle. Cette manœuvre induit une impulsion migratoire de « homing », soit un retour à l'habitat initial situé à l'amont de l'ouvrage. La disposition des antennes de détection a été conçue pour permettre de définir des métriques comportementales standardisées qui permettent d'évaluer le fonctionnement de la passe à poissons et de la barrière immergée. Cette méthodologie a donné de bons résultats par le passé, dont certains ont fait l'objet de validations internationales via des publications d'articles dans des revues scientifiques (Ovidio et al., 2017 et 2020).

2. Matériels et méthodes

2.1 Site d'étude

L'Our traverse le Luxembourg, la Belgique et l'Allemagne et appartient au bassin du Rhin. C'est une rivière caractéristique de la zone à ombre (Huet, 1949) qui prend sa source à Manderfeld à une altitude de 653m. Ce cours d'eau, long de 96 km est alimenté par un bassin versant de 277 km². L'Our se jette finalement dans la Sûre à Wallendorf, à une altitude de 177m. L'Our fait partie du bassin versant de la Moselle, dernier bastion de la moule perlière à l'ouest du Rhin (source Natura2000).

Au village de Weweler, sur la Commune de Burg-Reuland se trouvait le dernier obstacle majeur à la libre circulation des poissons sur l'Our. Le barrage d'Ouren avait pour but d'alimenter la pisciculture et la centrale hydroélectrique (CHE) du Weweler-Mühle (<http://www.parcsnaturelsdewallonie.be>). En 2016, cet ouvrage a été modifié pour y installer une passe à poissons (Figure 1) composée d'une rampe rugueuse et d'un chenal à bas débit afin de garantir la montaison de la faune piscicole à différents débits et de maintenir une alimentation en eau de la pisciculture et de la CHE.



Figure 1: Photo du barrage de Weweler avec à gauche de l'image, le canal à bas débit, au centre, la passe rugueuse et à droite le canal d'alimentation de la CHE et de la pisciculture.

La politique de répartition du débit au niveau de la passe à poissons est d'ailleurs guidée par l'exploitation de la pisciculture. Les 250 premiers l/s sont réservés au fonctionnement normal de l'élevage, les 1000 l/s suivants constituent le débit réservé du cours principal de la rivière (longueur : 950m). La CHE est alimentée lorsque le débit dépasse 1250 l/s (Rapport d'urbanisme : Floecksmühle, 2010).

Lors de l'aménagement de la passe à poissons, une barrière immergée a été construite en aval du canal de fuite de la CHE, à la confluence entre le lit de la rivière et ce canal de fuite, afin de réduire l'attractivité induite par le canal de fuite. et d'empêcher les poissons en montaison de l'emprunter comme voie de migration et de se retrouver « bloqués » au pied des turbines. Son design a été conçu de façon à remplir son rôle répulsif tout en évitant l'augmentation de la hauteur d'eau au pied des turbines. En effet, une augmentation de la hauteur d'eau modifierait

la hauteur de la chute au niveau de la CHE et causerait une perte de production hydroélectrique non envisageable.

Le bureau d'ingénieurs *Floeksmuhle*, a donc mis en place un seuil (Figures 2 et 3) d'une hauteur totale de 0,5 m et d'une largeur de 11m. La longueur totale du seuil est de 3,3m, avec une longueur de 2,5m pour le radier en amont de la chute et 0,8m pour le radier aval. Des enrochements ont été placés à l'amont et à l'aval directes de la barrière afin de stabiliser l'édifice et de le protéger de l'érosion.

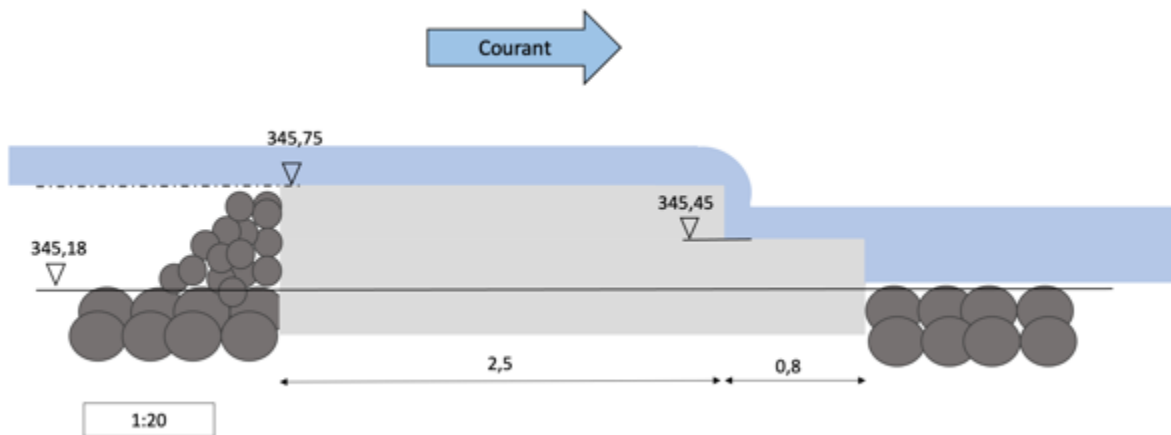


Figure 2 : Représentation schématique du seuil immergé présent en fin de canal de fuite de la CHE de Weweler.



Figure 3 : Photo à bas débit du seuil immergé présent en fin de canal de fuite de la CHE de Weweler (Source DCENN).

2.2 Technique de télémétrie : la radio-télémétrie

Etant donnée les paramètres physiques des voies de passages à étudier (largeur, débit, dévalaison de bois flottés), la radio-télémétrie est la technologie qui a été sélectionnée pour effectuer le suivi.

Cette technologie utilise des ondes radio très haute fréquence pour capter à distance, via une antenne, des signaux envoyés par un émetteur radio. Ces émetteurs biocompatibles permettent de suivre les déplacements des poissons après leur implantation dans la cavité intra-péritonéale. Les récepteurs radio utilisés (récepteurs Orion, commercialisés par Sigma Eight®) enregistrent les signaux émis dans une gamme de fréquence proche de 150MHz.

Deux types d'antennes ont été utilisés en fonction de la précision spatiale désirée.

- Les antennes aériennes de type yagi : ces antennes sont placées sur une structure aérienne. Elles couvrent une vaste zone pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres en fonction des conditions environnementales. En contrepartie, la précision du champ de détection de ces antennes est faible.
- Les antennes subaquatiques : ces antennes sont conçues en atelier chez Profish. Placées sous l'eau, leur champ de détection s'étale généralement sur un rayon de 3m autour de l'extrémité de l'antenne. Ce champ restreint permet un suivi plus fin des déplacements des poissons.

2.3 Principe d'installation

Le principe simplifié d'une installation télémétrique destinée à déterminer l'efficacité d'un ouvrage de franchissement est repris à la Figure 4. La nomenclature associée aux noms des antennes est uniformisée avec la nomenclature établie lors de suivis précédents en télémétrie RFID (Sonny et al., 2020).

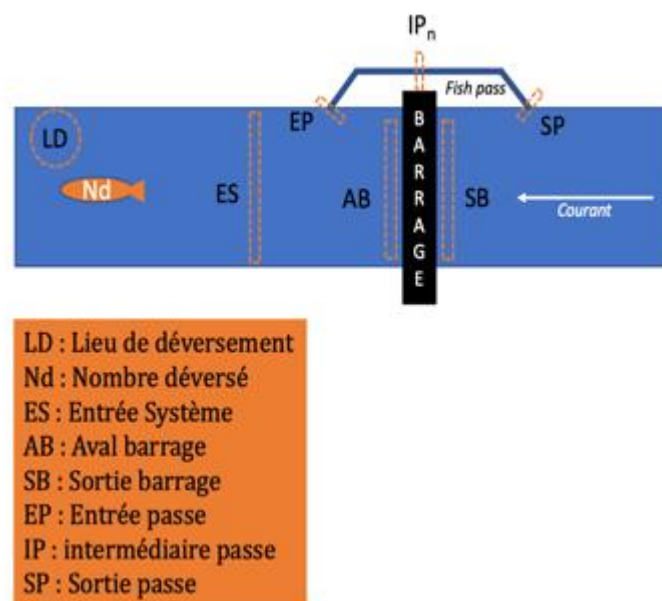


Figure 4 : Schéma simplifié du dispositif télémétrique déployé pour définir les différentes variables étudiées.

2.4 Dispositif radio sur le site du Weweler

2.4.1 Vue générale

Cinq antennes de télémétrie-radio ont été installées sur le site (Figure 5). Les antennes ES, AB, SB, et EP sont de type subaquatique. L'antenne SP combine une antenne subaquatique avec une antenne aérienne.

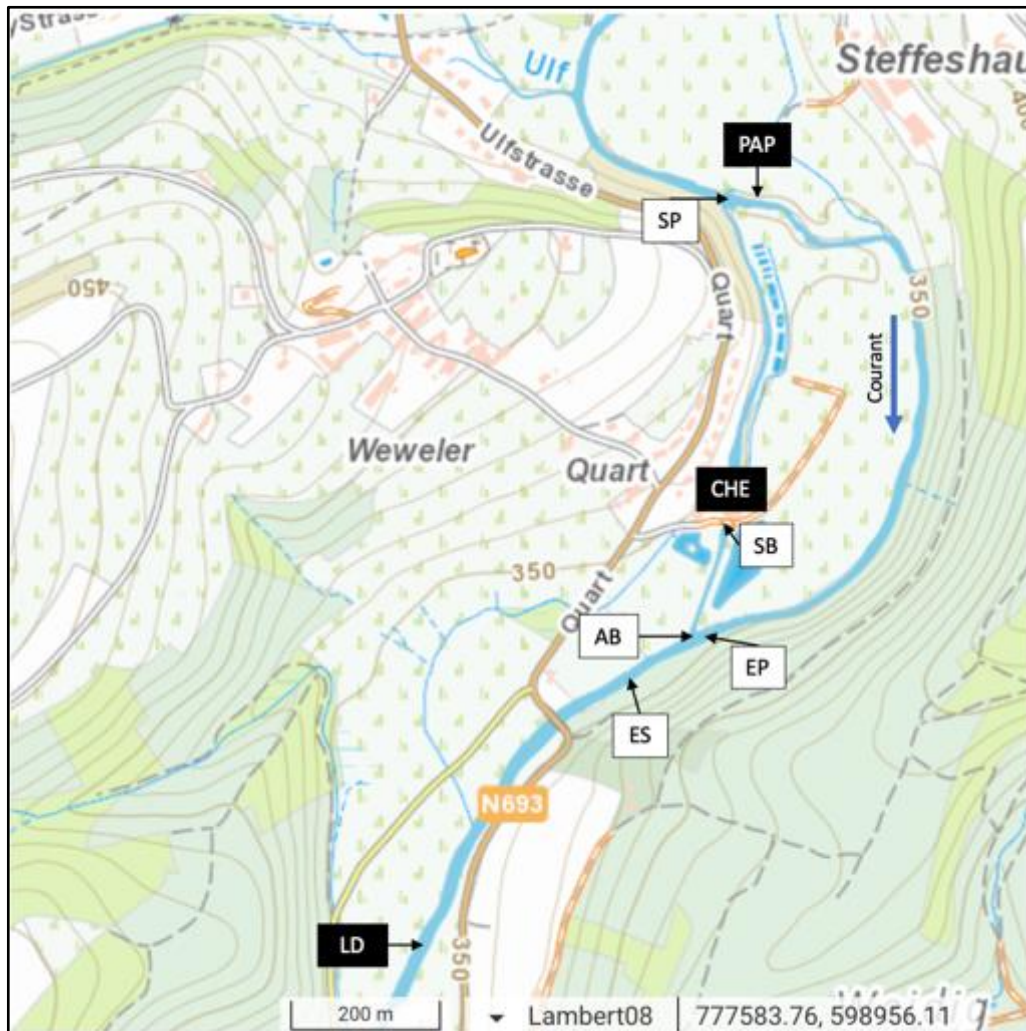


Figure 5 : Répartition du dispositif de télémétrie sur le site de Weweler. LD: lieu de déversement; CHE : centrale hydro-électrique; PAP : passe à poissons.

2.4.2 Antenne entrée système (ES)

L'antenne ES (Figure 6) a été placée 85 m en aval de la confluence pour détecter les poissons qui entrent dans le système d'étude. Elle consiste en une chaîne aquatique comportant 4 brins d'antennes subaquatiques répartis sur toute la largeur de la rivière. Les 4 brins sont reliés entre eux à l'aide d'un "combiner" afin de ne former qu'une seule antenne.



Figure 6 : Photo à haut débit de la chaîne aquatique formant l'antenne ES.

2.4.3. Antenne aval Barrage (AB)

L'antenne AB est composée d'une chaîne fixée à l'aval direct du seuil et reliant la rive gauche du canal de fuite à la rive droite. Cette chaîne ne comporte qu'un seul brin subaquatique dont l'extrémité est localisée à 3 mètres de la rive droite.

2.4.4 Antenne sortie Barrage (SB)

L'antenne SB (Figure 7) couvre l'aval des turbines de la CHE. Celle-ci est composée de deux brins d'antennes subaquatiques, chacun fixés sur une corde plombée. Une extrémité de chaque corde est fixée au pont de la centrale tandis que l'autre est libre dans le courant. Une corde est fixée à 3 mètres de la RG et une deuxième est fixée à 3 mètres de la RD. Les deux brins sont connectés entre eux via un "combiner" pour ne former qu'une seule antenne.



Figure 7 : Antenne SB couvrant l'aval des turbines de la CHE.

2.4.5 Antenne entrée de passe (EP)

L'antenne EP a été placée dans le bras principal de la rivière, 6 mètres à l'amont de la confluence avec le canal de fuite et 900 mètres en aval de l'entrée effective de la passe. Cette antenne se présente sous la forme d'une chaîne traversant perpendiculairement la rivière, à même le substrat. Cette chaîne comporte trois brins d'antenne subaquatique dont les extrémités sont placées à 3 mètres de la rive gauche, au milieu du lit et à 3m de la rive droite. Ces 3 brins sont connectés entre eux par un "combiner" afin de ne former qu'une seule antenne.

2.4.6 Antenne sortie de passe (SP)

L'antenne SP (Figure 8) est placée en amont de la passe à poissons. Elle combine une antenne aérienne, fixée sur un mât et orientée vers la rampe rugueuse, à une antenne subaquatique fixée dans le premier bassin amont du chenal à bas débit. L'antenne SP permet la confirmation de la sortie du système d'étude et donc le franchissement par la PAP.



Figure 8 : Antenne SP. A) Antenne aérienne couvrant la rampe rugueuse. B) & C) Antenne subaquatique dans le bassin de sortie de la PAP.

2.4.7 Récepteurs radio et matériel annexe

Chaque Antenne est reliée à un récepteur radio qui enregistre les fréquences sélectionnées lors du paramétrage. Les récepteurs sont alimentés par une batterie 12v. Un chargeur de batterie intelligent, alimenté en 230v, maintient la charge des batteries. En cas de perte du 230v, les batteries alimentent de façon autonome les récepteurs. Lorsque la distance entre l'antenne et les récepteurs l'impose, 1 à 2 amplificateurs sont placés afin de garantir une réception optimale des signaux émis dans le champ de détection visé.

2.4.8 Zones de détections

Lors de l'installation des antennes, un *mapping* préliminaire a été réalisé avec un tag de 3,3g pour s'assurer de l'optimisation du système (couverture de la zone ciblée et non-superposition des champs de détection). Le 19/11, les champs de détection des antennes AB et EP ont été testés une seconde fois mais avec un tag de 7,2g (le plus gros modèle utilisé lors du marquage) afin de confirmer que l'augmentation de la taille des marques ne causait pas une superposition des champs de détection.

Pour ce faire, un premier réseau fixe de bouées (Figure 9A et Figure 10: bouées A-H) reliées à des parpaings a été installé en aval de la barrière immergée. La localisation du site ne permet pas une utilisation précise du GPS. La position de chaque bouée a donc été mesurée par bi-angulation à partir des extrémités gauche et droite de la barrière immergée (qui ont également servi de positions fixes RG & RD dans le réseau). Une fois le réseau installé, un tag de 7,2g a été maintenue par un opérateur au niveau de la bouée durant 3 minutes. L'heure de début et de fin (hh:mm:ss) ont été enregistrées avec précision afin de récupérer les données dans les récepteurs en fonctionnement. Des positions supplémentaires ont été enregistrées à l'aide de 2 bouées « semi-mobiles » (notées Zi sur la carte, Figure 10) qui étaient déplacées en fonction des zones à tester. Les positions Zi ont été mesurées par triangulation sur les bouées A-G.

Un deuxième réseau fixe (Figure 10: bouées B1_i & D₂-H₂) a ensuite été installé au niveau de l'antenne EP par triangulation sur les points fixes [RG ;A-C]. Les points fixes [RG ;A-C] ont été intégrés aux tests du 2^{ème} réseau. La méthodologie de prise de données est identique à celle utilisée sur le premier réseau (figures 9B).



Figure 9. A : réseau de mapping n°1 ; B : réseau de mapping n°2

Les résultats montrent 2 zones de détections proches mais bien distinctes entre l'antenne AB et l'antenne EP (Figure 10). La différence de méthodologie utilisée entre le *mapping* préliminaire et le second *mapping* n'a pas permis de comparer précisément les résultats entre de détection entre une tag de 3,3g et un tag de 7,2g. Néanmoins, contrairement à ce qui était annoncé par le fabricant, les résultats sont semblables et ont permis d'analyser les jeux de données de détection de la même manière, peu importe le type de tag.

Les limites du cours d'eau sur la carte (Figure 10) proviennent de *topomapviewer.ngi.be* et sont plus larges que les limites du lit de la rivière lors du test de mapping. C'est pourquoi les bouées G et BL1 semblent éloignées de la rive. Pour l'antenne AB, la zone de détection mesurée est très proche de la zone de détection maximale. Quant à l'antenne EP, la zone de détection mesurée était limitée par la très faible hauteur d'eau en rive gauche le jour du mapping. Suite aux résultats obtenus, nous avons estimé une zone de détection plus importante lors des conditions de hautes eaux (Figure 10).

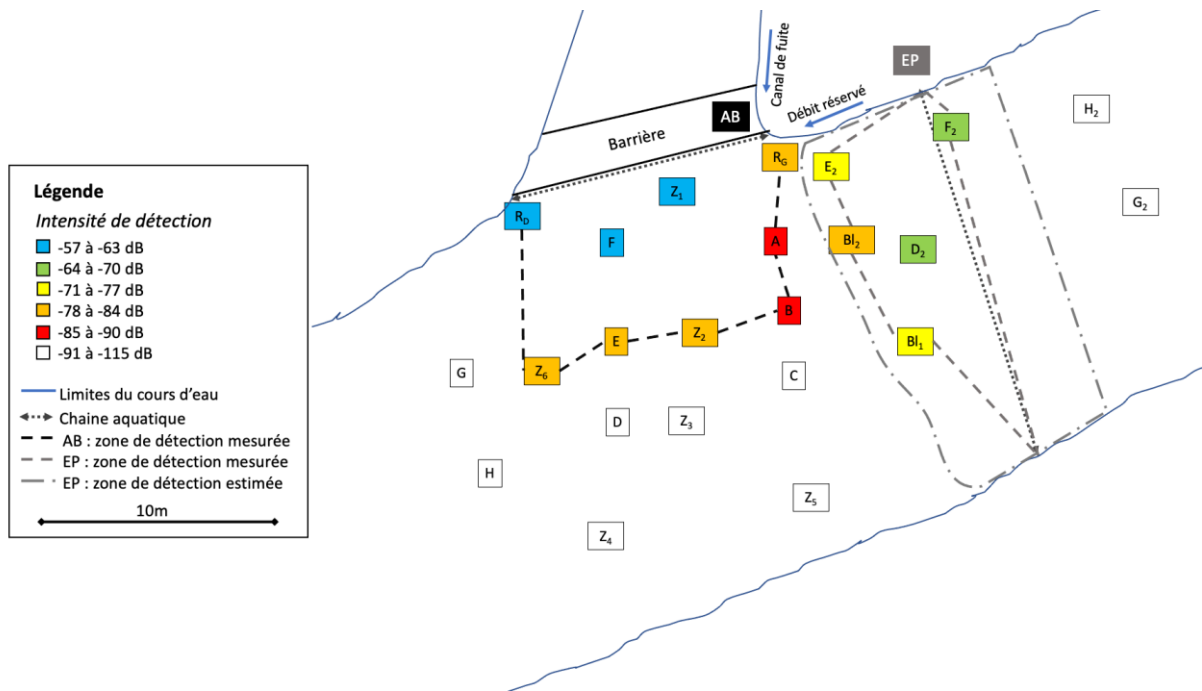


Figure 10 : Cartographie des zones de détections des antennes AB et EP mesurées à l'aide d'un tag de 7,2g lors du mapping du 19/11/2020. Les lettres encadrées sont les marquages utilisés lors du mapping.

2.5 Variables comportementales et temporelles

D'un nombre de poissons marqués et déversés dans la rivière à l'aval (N_d), on définit :

- Le Taux de montaison (T_M) : nombre de poissons détectés par l'antenne "Entrée Système ES" par rapport au nombre de poissons déversés (N_d).
- Le Taux d'approche (T_A) : nombre de poissons détectés au pied du barrage (N_{AB}) et à l'entrée de la passe (N_{EP}) par rapport au nombre de poissons déversés (N_d).
- Nombre d'approches de la passe : Nombre de fois où un poisson a été détecté en EP avec un écart minimum d'1/2h entre la dernière détection d'une première approche et la première détection d'une seconde approche.
- L'attractivité de la passe à poissons : rapport du nombre de poissons détectés en entrée de passe (N_{EP}), au nombre de poissons déversés ($N_d = \text{attractivité brute}$), ou au nombre de poissons détectés en entrée de passe et au pied du barrage ($N_{EP} + N_{AB} = \text{attractivité corrigée}$).
- L'efficacité de la passe à poissons : rapport du nombre de poissons détectés en sortie de passe (N_{SP}), au nombre de poissons déversés ($N_{SP} / N_d = \text{efficacité brute}$) ou au nombre de poissons détectés en entrée de système ($N_{SP} / N_{ES} = \text{efficacité corrigée}$).

1) ou encore au nombre de poissons détectés en entrée de passe ($N_{SP} / N_{EP} =$ **efficacité ajustée**).

Dans le cas de l'étude au Weweler, des variables comportementales propres à la barrière immergée ont été ajoutées pour déterminer son rôle répulsif :

- L'attractivité corrigée de la barrière : nombre de poissons détectés en aval barrage (N_{AB}) par rapport au nombre de poissons détectés en entrée de passe et au pied du barrage ($N_{EP} + N_{AB}$).
- Nombre d'approches de la barrière : Nombre de fois où un poisson a été détecté en AB avec un écart minimum d' $1/2h$ entre la dernière détection d'une première approche et la première détection d'une seconde approche de la barrière immergée.
- La franchissabilité ajustée de la barrière : rapport du nombre de poissons détectés en sortie de barrage en amont du seuil (N_{SB}), au nombre de poissons détectés à l'aval du barrage (N_{AB}).
- La répulsivité corrigée de la barrière : taux d'individus détectés en amont du seuil (N_{SB}) en fonction du nombre de poissons détectés en entrée de système et qui n'ont pas franchi la barrière (N_{SB}/N_{ES}).

A ces variables comportementales, ont été ajoutées des variables comportementales temporelles, définies comme :

- I. Temps d'approche : temps entre le moment de déversement et la première détection au niveau du système de détection
- II. Durée de franchissement complet : temps entre la première détection en entrée de système et la dernière détection en sortie de passe, se rapporte donc à l'efficacité corrigée.
- III. Durée dans le système : temps entre la première détection en entrée de système et la dernière détection dans le système. C'est une variante du Durée de franchissement complet pour les individus qui ne franchissent pas la passe.
- IV. Durée de franchissement de la passe : temps entre la dernière détection en entrée de passe et la première détection en sortie de passe, se rapporte à l'efficacité ajustée.
- V. Temps au niveau la barrière immergée : temps cumulé entre la première et dernière détection en aval du barrage (seuil) à chaque approche de la barrière immergée.
- VI. Temps dans le canal : temps entre la dernière détection en AB avant la première détection en SB et la première détection en AB après la dernière détection en SB.

2.6 Capture, marquage et déversement des poissons sur l'Our

L'évaluation de la barrière immergée sur l'Our a eu lieu en automne, il a été décidé que la truite commune serait le modèle biologique lors de cette étude. En effet, cette espèce manifeste en automne, lors de sa période de migration de reproduction, un comportement de montaison vers des zones de frai. La réalisation de capture en amont et la translocation en aval du site d'étude a pour but d'augmenter la probabilité d'une montaison par un phénomène de homing. La truite commune était dès lors la meilleure candidate pour maximiser les taux de détections et pour exprimer des déplacements aptes à confirmer ou infirmer l'efficacité de la barrière immergée.

Le 21 octobre 2020 (Figure 11), un premier lot de $N = 4$ poissons a été capturé par pêche électrique à pied, 580 mètres en amont du barrage sur un linéaire de 180m. Le même jour, un second lot de $N=9$ individus a été capturé à 1900m en amont du barrage de Weweler sur un linéaire de 200m. Afin de compléter l'effectif des poissons suivis, un troisième lot de $N = 17$

poissons de taille suffisante a été capturé le 28 octobre 2020 dans l’Ulf (linéaire de 400m de rivière), un petit affluent de l’Our dont la confluence est située 260m en amont de la passe à poissons (Figure 12). Les mêmes méthodes de marquage et de déversement ont été utilisées. Pour le marquage, après la biométrie, un émetteur radio a été inséré chirurgicalement dans la cavité intrapéritonéale de chaque poisson (Figure 13). Ensuite le jour même, post marquage, les 3 lots ont été déversés 600m en aval du seuil (barrière immergée) en sortie du canal de fuite de la CHE (Figures 11 et 14) : lots 1 et 2 à 17h00 le 21 octobre 2020 et le lot 3 à 14h30 le 28 octobre 2020.

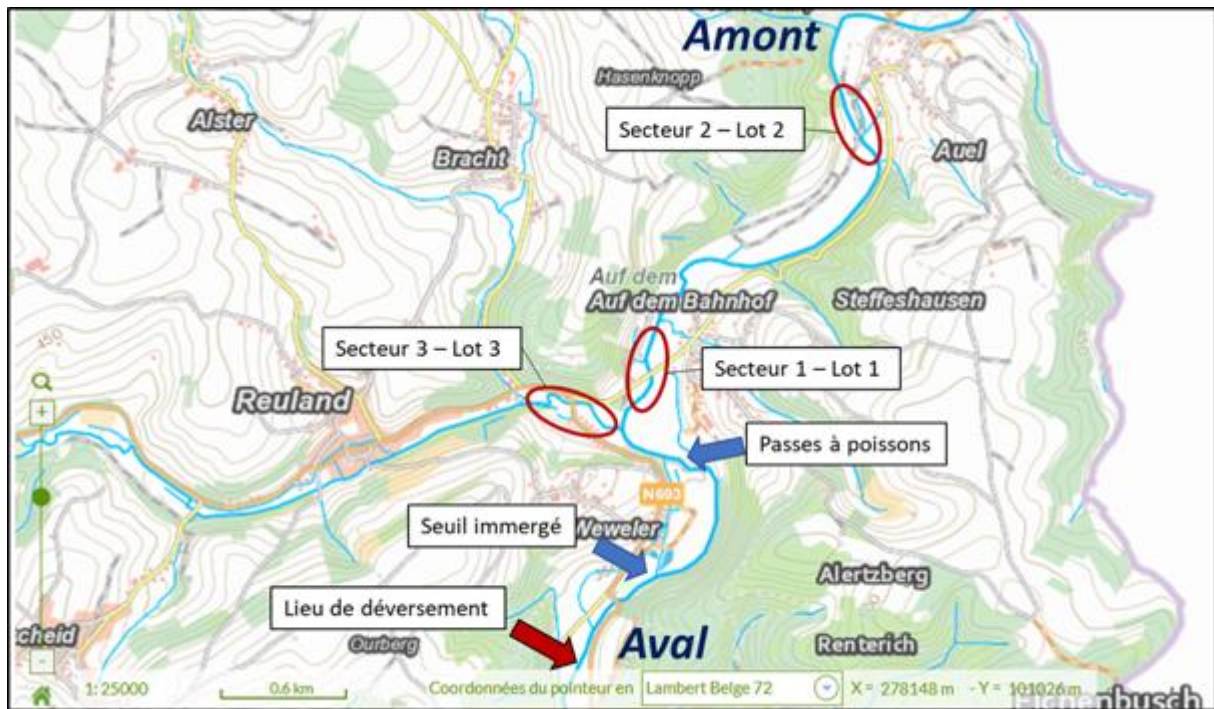


Figure 11 : Illustration cartographique des lieux de pêches électriques et du lieu de déversement des poissons.

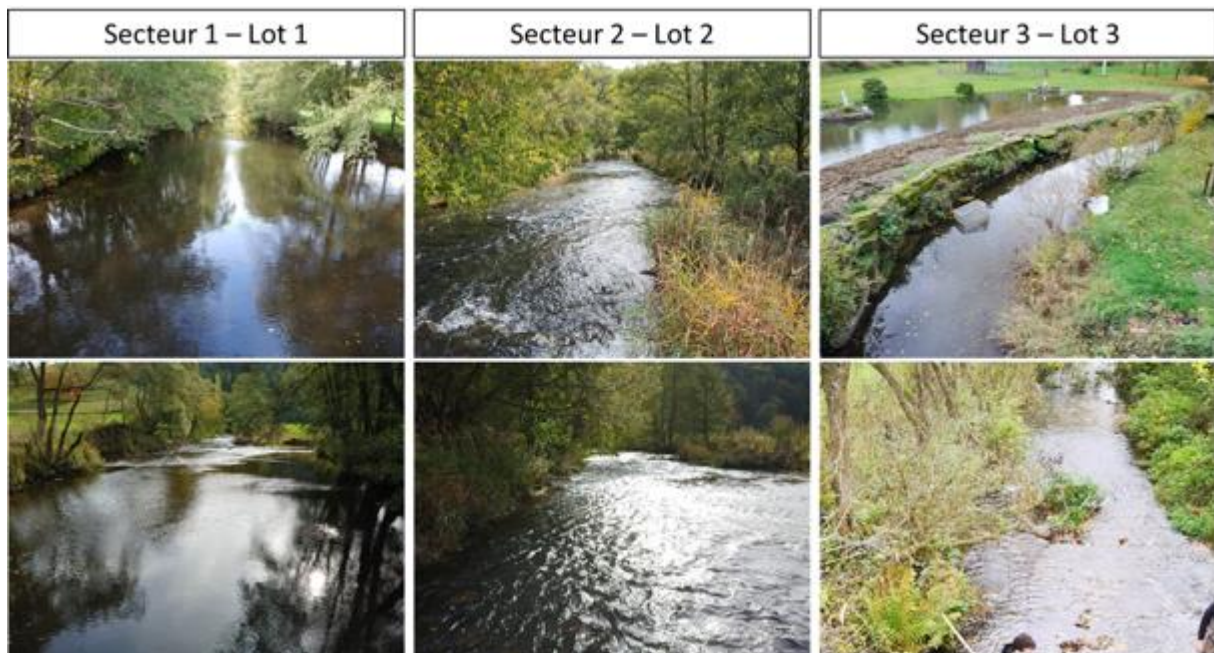


Figure 12 : Photos des 3 secteurs parcourus par pêche à l'électricité.



Figure 13 : Photos de l'insertion de l'émetteur radio par opération chirurgicale (à gauche) et de la prise de la biométrie (à droite)



Figure 14 : Photos du lieu de déversement sur l'Our (à gauche) à 600m en aval du seuil et des poissons déversés (à droite)

2.7 Biométrie des poissons capturés et marqués

Un total de N= 30 truites, réparties en 3 lots et 2 jours de pêche a été capturé et marqué. La taille moyenne des poissons marqués était de 292,9 mm (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractérisation des lots de truites capturées et marquées

Lot	Date	Cours d'eau	Espèce	N	Taille moyenne (mm) ± SD
1	21/10/20	Our	Truite	4	230,3 ± 0,4
2	21/10/20	Our	Truite	9	283,4 ± 55,2
3	28/10/20	Ulf	Truite	17	312,6 ± 39,4
Total				30	292,9 ± 49,1

2.8 Relevé des paramètres physiques

2.8.1 Température

Le 28/10/2020, un logger automatique (Hobo MX2203 tidbiT) a été installé dans le premier bassin (amont) du canal à bas débit. Suite aux difficultés d'accès liées à la montée des eaux, le logger a été déplacé le mois suivant au niveau de la passerelle enjambant le canal d'amenée. L'enregistrement des données a été arrêté le 26/01/2021. Sur cette période la température médiane était de 5,6°C pour une température minimum de 0,7°C le 30/11/2020 et une température maximum de 13,5°C le 28/10/20 (Figure 15).

2.8.2 Débit total (Qtotal)

Le débit total s'écoulant dans l'Our au niveau du Weweler-Muhle (Qtotal) a été obtenu en cumulant les données des stations limnimétriques de Weweler- Our (L7410) et Reuland – Ulf (L6080). Entre le 21/10/2020 et le 26/01/2021, le débit médian était de 5,2 m³/s (Figure 15). Le débit le plus faible enregistré était de 0,62 m³/s le 21/10/2020 et le débit maximum a été enregistré le 24/12/2020 avec une valeur de 51,5 m³/s.

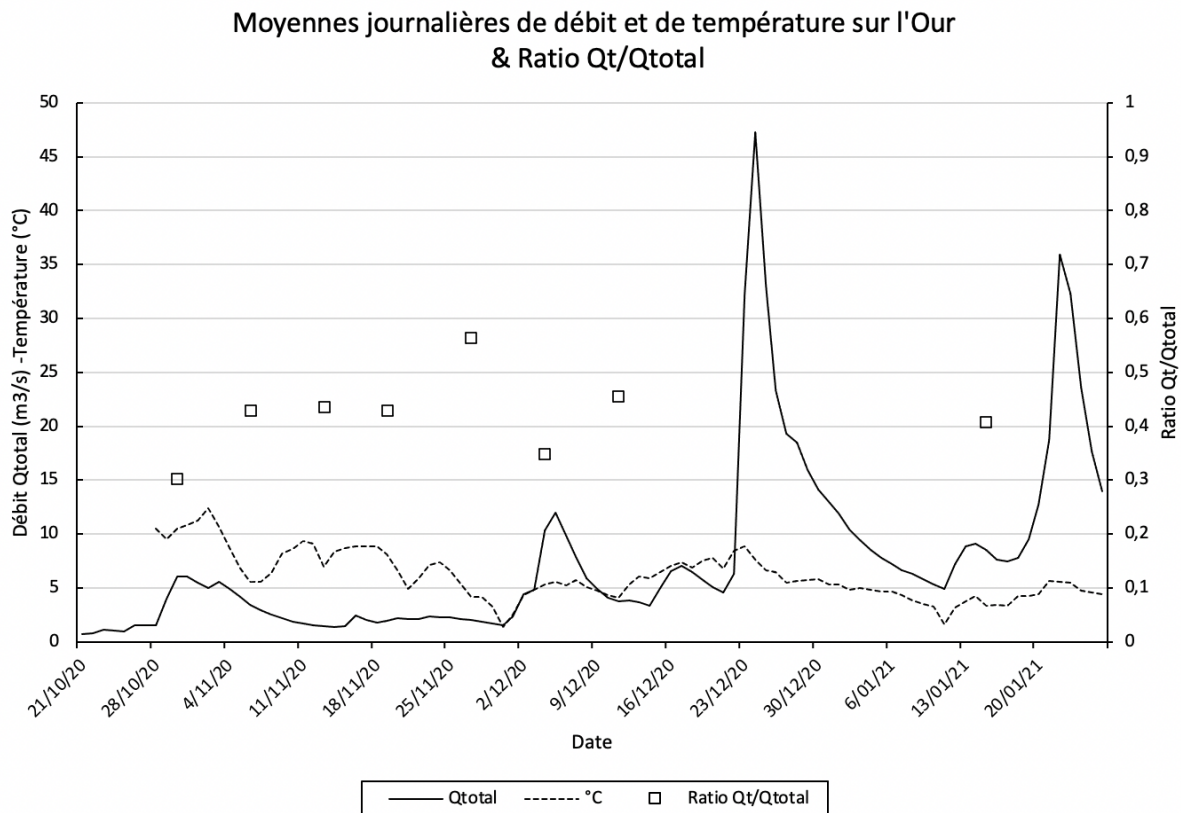


Figure 15 : Graphique des moyennes journalières de débits et de température enregistrées sur l'Our durant la période de l'étude.

2.8.3 Débit turbiné (Qt)

Sur le site hydroélectrique du Weweler-Muhle, aucun système d'enregistrement du débit turbiné ou de la production énergétique n'existe. Seul un affichage en temps réel de la production est accessible. La production énergétique a été relevée ponctuellement lors des téléchargements hebdomadaires.

La vitesse d'écoulement (V) a été mesurée avec un courantomètre (FLO-MATE MODEL 2000, Marsh-McBirney). A l'aval de la barrière immergée et dans le débit réservé, la sonde était placée 10 cm au-dessus du substrat afin d'éviter qu'elle ne se trouve dans les turbulences d'un obstacle. Pour l'amont de la barrière, la sonde était placée à 1 cm au-dessus du fond, de manière à garantir son immersion totale à bas débit. Les mesures ont été effectuées en rive gauche, au milieu et en rive droite sur la barrière immergée. En aval de celle-ci, les 3 points de mesure se situaient à la limite gauche du débit turbiné, au milieu et en rive droite. Pour le bras principal, 4 points de mesures étaient répartis sur la largeur du lit, à la pointe de la presqu'île formée par la confluence.

Le débit turbiné (Qt) a été estimé en multipliant la vitesse d'écoulement (V) par la hauteur d'eau moyenne (H , voir point 2.7.4.I) et la largeur (l) du lit au niveau de la barrière ($Qt = V \cdot H \cdot l$).

2.8.4 Paramètres de franchissabilité de la barrière immergée

La franchissabilité d'un seuil comme la barrière immergée installée sur le site hydro-électrique du Weweler-Muhle peut être estimée par un protocole de mesures physiques tel que le protocole d'Information sur la Continuité Ecologique ICE (Baudoin et al., 2015). Dans ce protocole, l'espèce cible ainsi que 3 critères physiques principaux sont pris en compte pour définir la classe de franchissabilité de l'obstacle. La truite, qui est ici le seul modèle biologique de l'étude, voit ses capacités de saut et de nage évoluer en fonction de sa taille. Cette espèce est donc subdivisée en catégorie 4a [25-55cm] ou 4b [15-30 cm] (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs de classe ICE en fonction des hauteurs de chute.

Groupe ICE	Espèces	Saut	Valeurs seuils de chute (DH) pour le diagnostic de seuil à parement vertical >150% (m)		
			Classe ICE		
			1	0,66	0,33
4a	<i>Salmo trutta</i> [25-55]	Oui	≤0,50]0,50-0,90]]0,90-1,40]
4b	<i>Salmo trutta</i> [15-30]	Oui	≤0,30]0,30-0,50]]0,50-0,80]

Pour ces deux groupes, les valeurs cibles des paramètres physiques mesurés seront donc différentes. Les 3 critères physiques mesurés sont les suivant :

- I) La charge de l'obstacle (H) :
Représente la hauteur d'eau qui s'écoule sur la crête de l'obstacle. Celle-ci doit être égale à la hauteur d'eau minimum (Hmin) qui permet la nage de l'espèce cible. La charge minimale Hmin est donc égale à la Hmin de l'espèce.
Hmin (4a) = 0,1m
Hmin (4b) = 0,05m.

- II) La hauteur de chute (DH) :
Représente la hauteur que le poisson doit sauter ou nager pour franchir l'obstacle. Pour un seuil vertical comme la barrière immergée de Weweler, les valeurs de DH sont reprises dans le tableau 2 selon leur probabilité de franchissement (1=100%, 0,66=66% et 0,33=33%).

III) La profondeur de fosse (Hf) :

Représente la profondeur de la fosse à l'aval de la chute. Cette fosse, généralement creusée par affouillement, permet au poisson de prendre son élan avant le saut. Les valeurs de références pour un seuil à parement vertical sont :

- a) $H_f \text{ min} = 0,3 \text{ m}$ pour un $DH \leq 0,25\text{m}$
- b) $H_f \text{ min} = 0,45 \text{ m}$ pour un $DH]0,26\text{m}-0,5\text{m}]$.

Lors de chaque journée de téléchargement, la charge (H) et la profondeur d'affouillement (Hf) de la barrière immergée (Figure 16) ainsi que les vitesses du courant sur la barrière, à l'aval de la barrière et dans le bras principal ont été mesurées. Lorsque les débits ne permettaient pas de se déplacer dans l'eau en sécurité, toutes ou une partie de ces mesures ont dû être abandonnées.

La charge du seuil (H), ainsi que la profondeur d'affouillement (Hf) ont été mesurées en rive gauche (RG), au milieu du lit (M), à 80 cm de la rive droite (RD-) et en rive droite (RD+) (Figure 17). Le point « RD - » a été ajouté là où l'homogénéité du profil en large de la barrière s'arrête (figure 17). La hauteur de chute (DH) est calculée selon la formule $DH = (H_b + H) - H_f$ où H_b est la hauteur de la barrière.

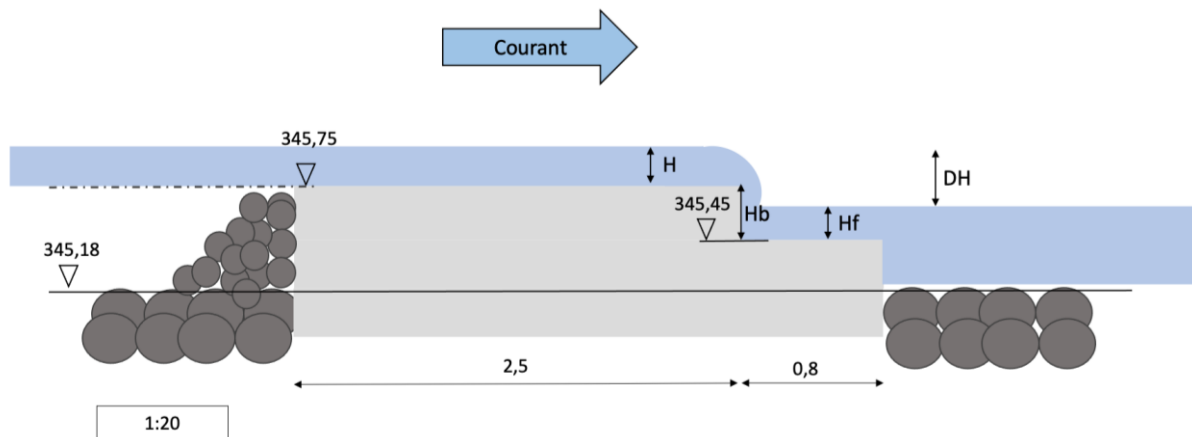


Figure 16 : Schéma de la barrière immergée avec la représentation des paramètres mesurés (H, Hb, Hf) nécessaires au calcul de la profondeur de Chute (DH). H = charge du seuil; Hb = hauteur de la barrière; Hf = profondeur d'affouillement.

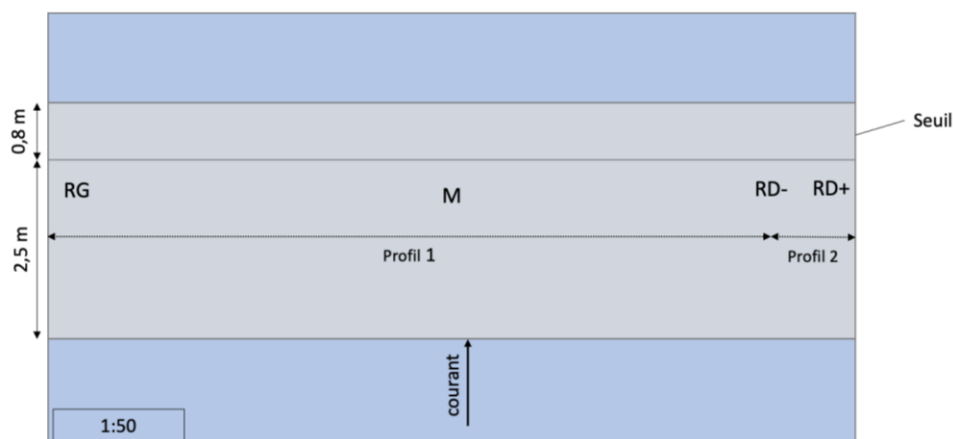


Figure 17 : Schéma de la barrière immergée avec les positions (RG, M, RD-, RD+) des mesures de vitesse d'écoulement, de charge (H) et de profondeur de fosse (Hf).

2.9 Télémétrie mobile

Le 18/12/2020, 3 secteurs (Figure 18) ont été parcouru avec un récepteur de télémétrie mobile (Ares Receiver, Sigma Eight Inc.) muni d'une antenne yagi afin de localiser les individus marqués qui n'ont pas été détectés dans le système d'étude.

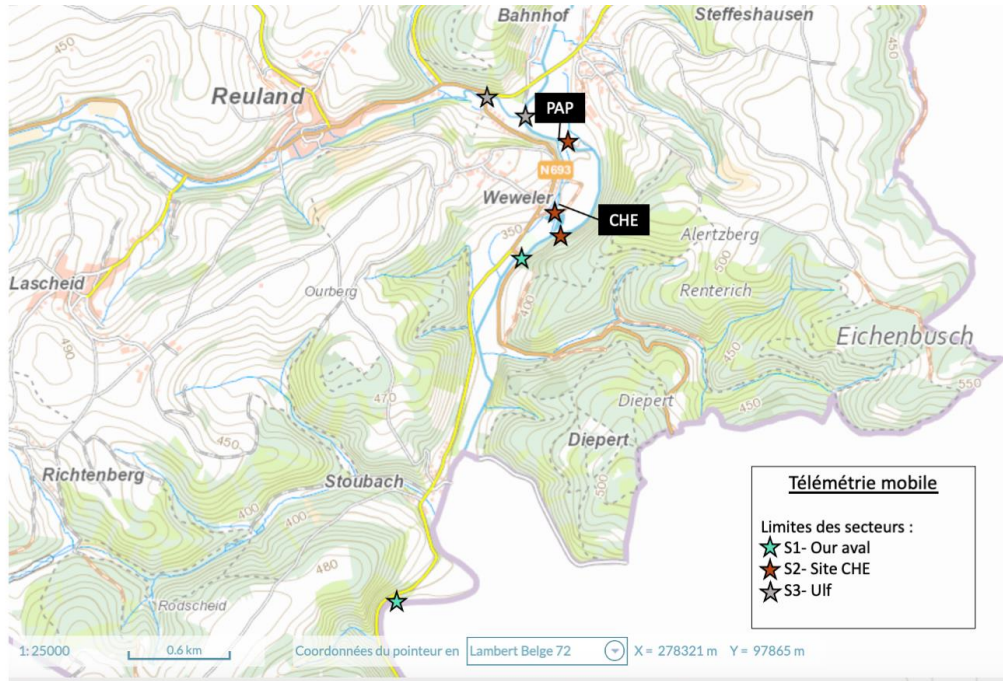


Figure 18 : Localisation des n=3 secteurs parcourus en télémétrie mobile

3. Résultats

3.1 Évaluation physique de la franchissabilité de la barrière immergée

Les variables qui influencent les conditions de franchissabilité de la barrière immergée de Weweler varie en fonction des conditions hydrologiques rencontrées lors des mesures. Le débit du bras principal de l'Our influence la hauteur d'eau à l'aval du seuil (H_f) et la profondeur de fosse (H_f) alors que le débit turbiné influence la charge (H) du seuil et la profondeur de fosse (H_f). Ces mesures ont été prises à 8 dates à différents débits (Tableau 3).

Tableau 3 : Valeurs hydromorphologiques observées au niveau de la barrière immergée du site de Weweler

Date	Débit Our (m^3/s)	Puissance turbines (kw)		Valeurs de Hauteur (m) au niveau du seuil		
		Turbine 1	Turbine 2	Hmoy	Hf moy	Dhmoy
30-10-20	6,20	70	0	0,17	0,41	0,06
06-11-20	3,50	54	0	0,15	0,20	0,24
13-11-20	1,42	14	0	0,09	0,05	0,34
19-11-20	1,80	21,5	0	0,11	0,09	0,32
27-11-20	2,04	32	0	0,12	0,09	0,33
04-12-20	10,77	55,5	0	0,32	0,61	0,02
11-12-20	3,90	59,5	0	0,16	0,18	0,28
15-01-21	8,54	93	0	0,24	0,49	0,05

Lors des 8 mesures effectuées au niveau de la barrière immergée le débit de l'Our était situé entre 1,42m³/s et 10,77m³/s. La charge moyenne de l'obstacle (Hmoy) était comprise entre 0,09m et 0,32m et la profondeur de fosse (Hf) entre 0,05m et 0,61m. Ces deux données varient de manière linéaire positive avec le débit de l'Our (Figure 19). Inversement, la hauteur de chute varie de manière linéaire négative avec le débit de l'Our et les valeurs étaient comprises entre 0,02m et 0,34m.

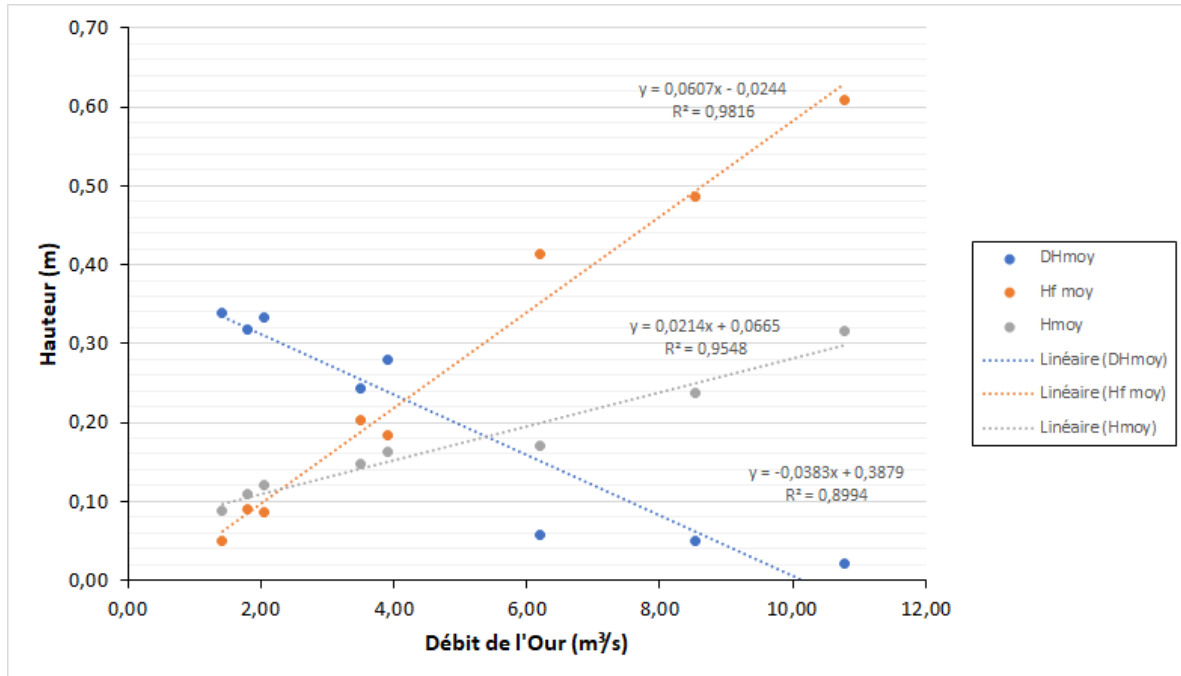


Figure 19 : Relations entre les mesures hydromorphologiques au niveau de la barrière immergée et le débit de l'Our

3.2 Bilan des détections

3.2.1 Répartition des détections

Entre le 21/10/2020 et le 18/12/2021, N = 20 poissons ont été détectés par le dispositif de détection. L'antenne d'entrée système (ES) a détecté N= 19 poissons sur les N= 20 détectés par la totalité du dispositif de détection (Tableau 4). L'antenne d'entrée de passe (EP) a enregistré la détection de N=19 truites (95% des poissons détectés). Sur les N= 19 poissons détectés en EP, N = 11 individus sont détectés par l'antenne de sortie de passe (SP), ce qui représente 11 franchissements pour 19 poissons détectés en EP : efficacité totale = 36,7% (11/30) et efficacité ajustée = 57,9 % (11/19). Sur la même période, l'antenne située à l'aval de la barrière immergée (AB) a détecté 80% des individus entrés dans le système. Cette zone apparaît donc comme attrayante pour les truites en montaison. De plus, 40% des poissons détectés dans le système d'étude ont franchi la barrière immergée et se sont présentés par la suite à l'amont du canal de fuite (antenne SB), juste en aval des turbines. Notons qu'entre le 19/12/2020 et le 26/01/2021, aucune détection n'a été enregistrée et qu'aucun individu n'a été détecté à l'aide de la télémétrie mobile.

Tableau 4 : Taux de détection des individus marqués et répartition par antenne des détections dans le système d'étude. ND : nombre déversé ; Nd : nombre détecté

ND (= 30)	Antenne					Total système
	ES	AB	SB	EP	SP	
N détecté	19	16	8	19	11	20
N détecté / ND	63%	53%	27%	63%	37%	67%
$\frac{N \text{ détecté}}{N \text{ détecté total}}$	95%	80%	40%	95%	55%	-

3.2.2 Comparaison des individus détectés et non détectés

Pour les N=20 individus détectés dans le système d'étude, 55% proviennent de l'Our contre 45% qui proviennent de l'Ulf (Tableau 5). La moitié des individus détectés ont été marqués avec un tag de 3,3g. L'autre moitié s'est vu implanter un tag de 7,2g. Le facteur de condition [poids (g) / Taille³ (cm) x 100] médian est de 1,08 (range : 0,92 – 1,23). Le rapport médian poids de la tag/poids du poisson (%tag) est de 1,92 (range : 1,04 – 3,17).

Pour les N=10 individus non-détectés, 20% ont pour origine l'Our, contre 80% pour l'Ulf. A noter que la moitié des individus non détectés dans le système ont été marqués avec un tag de 3,3g et l'autre moitié s'est vu implanter un tag de 7,2g. Le facteur de condition médian pour ces poissons non-détectés, est de 1,10 (range : 0,99 – 1,34) et le %tag médian est de 1,73 (range : 1,43 – 2,67).

Il n'y a pas de différence significative (test de Wilcoxon, $p > 0,05$) entre les individus détectés ou non-détectés pour les variables de *facteurs de condition* (k , $p=0,47$), de *rapport poids marque/poids du poissons* (%tag, $p=0,52$) ou de *la taille du poissons* ($p=0,96$). Bien qu'une tendance soit observée, les proportions d'individus détectés/non-détectés entre ceux capturés dans l'Our et ceux capturés dans l'Ulf ne sont pas significativement différentes (test de χ^2 , $p=0,06$).

Tableau 5 : Origine et biométrie des poissons détectés et non-détectés dans le système d'étude.

Statut	Origine		Médiane			
	Our	Ulf	Taille (mm)	Poids (g)	% Tag	Facteur k
Non-détectés	2	8	279,5	250,0	1,73	1,10
Détectés	11	9	308,5	293,0	1,92	1,08

3.3 Patrons de mobilité

Afin de faciliter la lecture des patterns de mobilité (exemple : Figure 21 à 24), un code couleur a été utilisé lors du traçage des graphiques (Figure 20). Les déplacements entre le lieu de déversement (LD) et l'antenne ES sont tracés en *noir*. Les déplacements dans le lit principal de la rivière entre l'Antenne ES et SP sont tracés en *vert*. Les déplacements dans le canal de fuite, entre les antennes AB et SB, sont quant à eux tracés en *rouge*. La totalité des patrons de mobilité se trouvent en annexe 1.

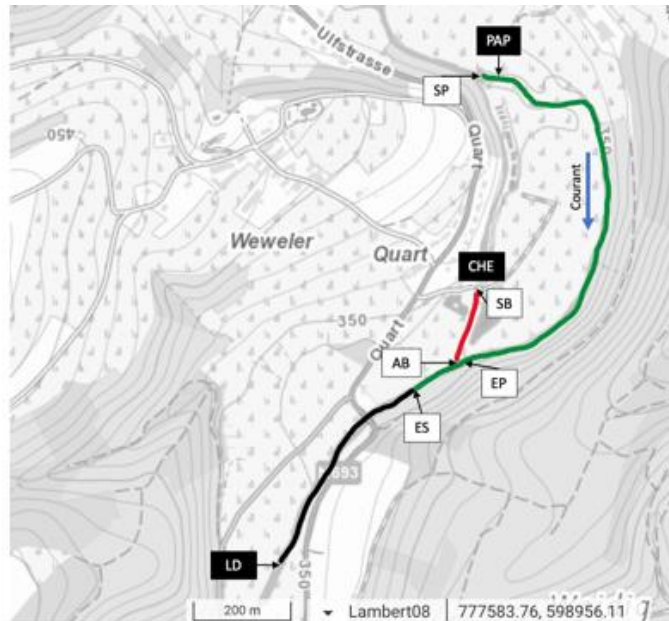


Figure 20 : Code couleur utilisé pour le traçage des graphiques des patrons de mobilité.

Trois catégories principales de patrons de mobilité ressortent chez les individus détectés. La première catégorie (P_SB, Figures 21 & 24) se caractérise par un passage par le canal de fuite de la CHE avec une détection par l'antenne SB. La seconde catégorie (P_AB, Figure 22) reprend les poissons qui ont été détectés en aval de la barrière immergée (antenne AB) mais qui ne l'ont pas franchie. La dernière catégorie (P_EP, Figure 23) est caractérisée par des individus détectés en entrée de passe (antenne EP) sans avoir été détectés par l'antenne AB.

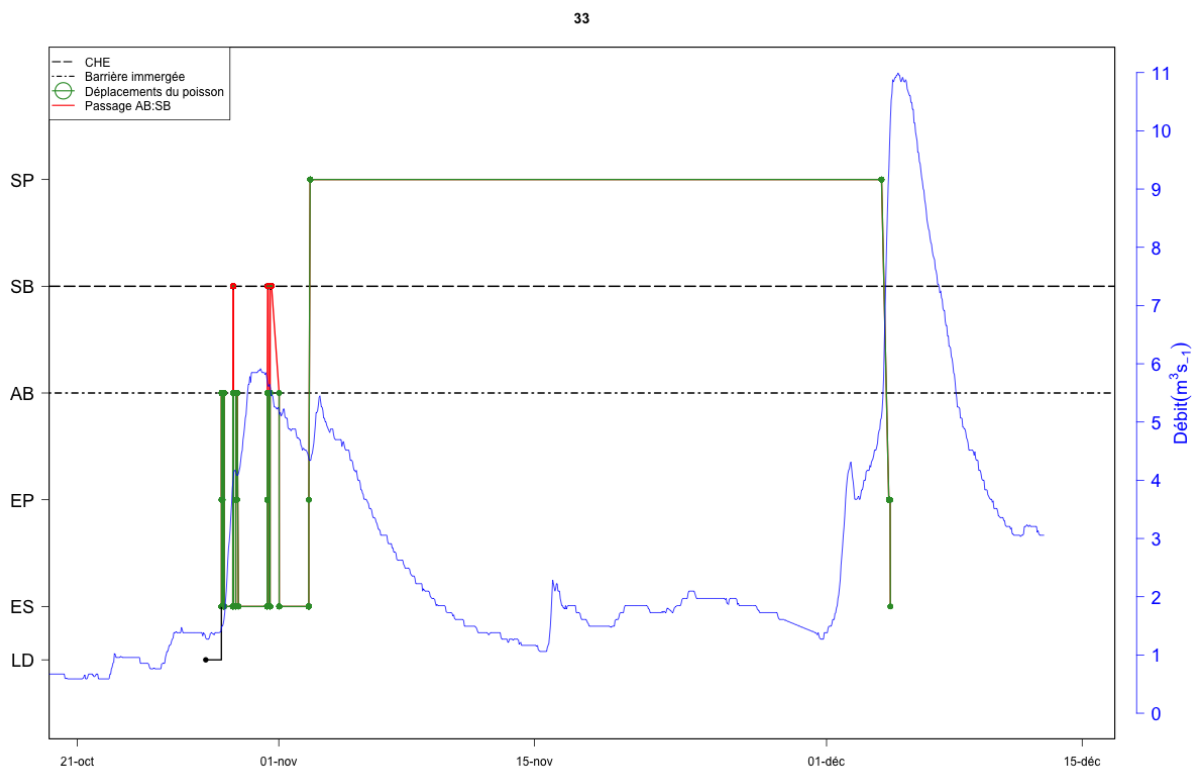


Figure 21 : Patron de mobilité du poisson 33 (P_SB).

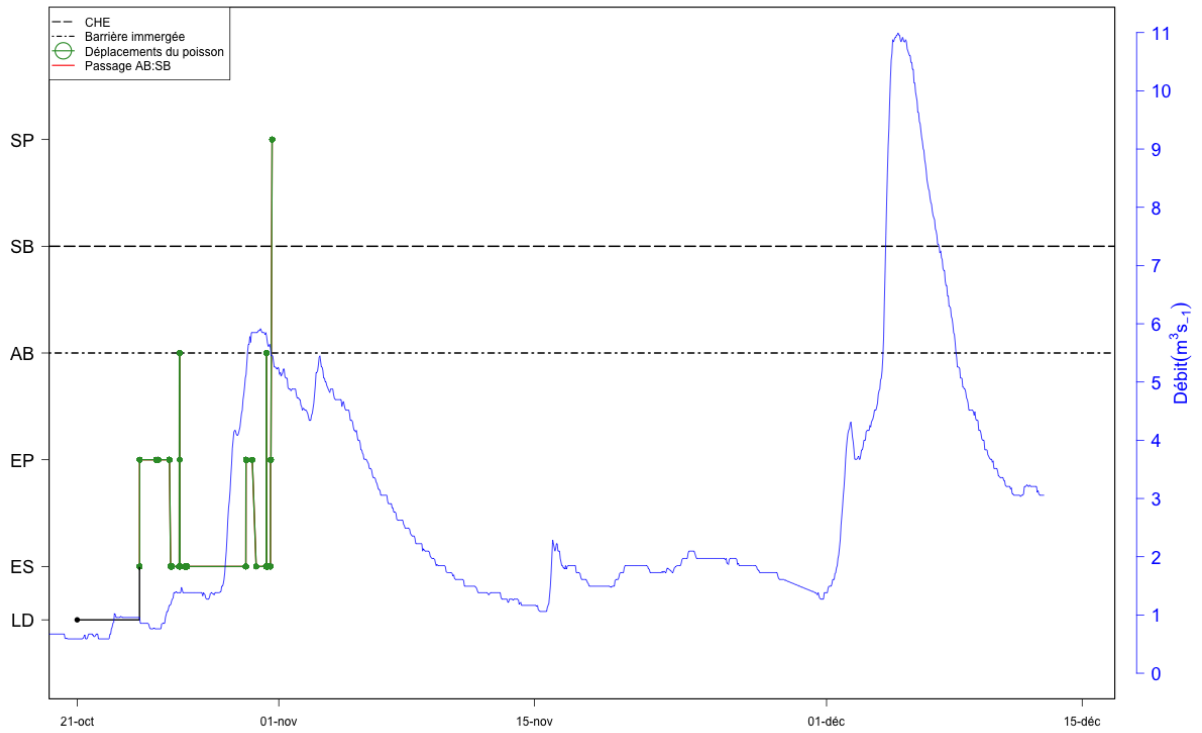


Figure 22 : Patron de mobilité du poisson 40 (P_AB).

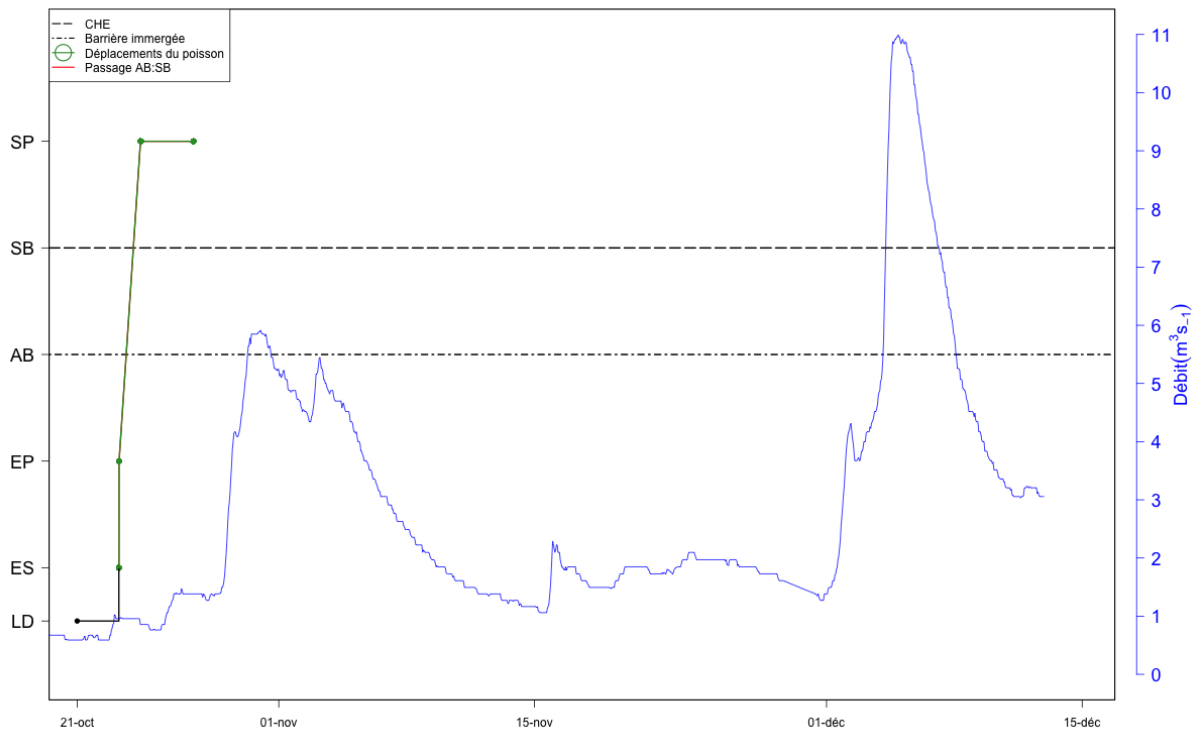


Figure 23 : Patron de mobilité du poisson 92 (P_EP).

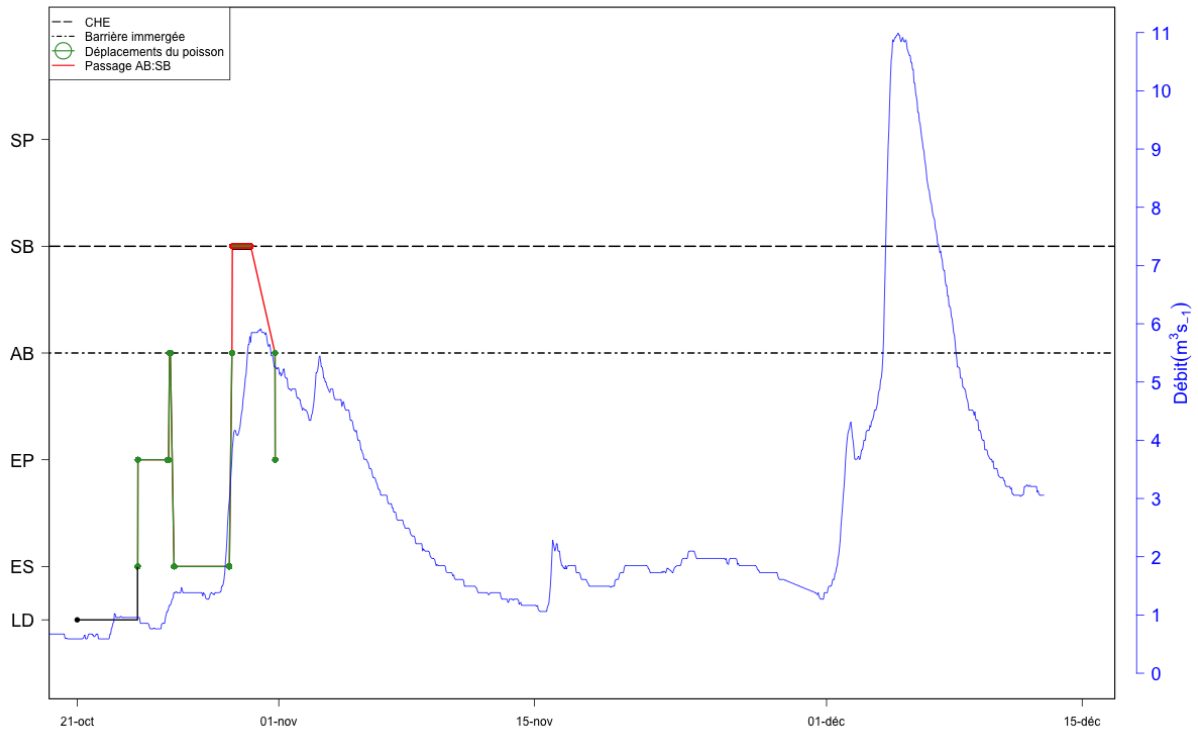


Figure 24 : Patron de mobilité du poisson 178 (P_SB).

3.5 Attractivité et efficacité de la passe à poisson

Le taux de montaison, défini par le nombre de poissons entrés dans le système par rapport au nombre de poissons déversés (20/30 individus), est de 67 % (Tableau 6). Nous avons choisi de remplacer dans toutes les formules utilisant le nombre de poissons détectés en entrée système ($N_{ES} = 19$) par le nombre total de poissons détectés dans le système ($N = 20$). Ce choix fait suite à la détection d'un individu dans le système sans qu'il n'ait été détecté à l'antenne ES. Le taux d'approche de la confluence est également de 67 %.

Sur la totalité des poissons détectés dans le système d'étude ($N = 20$), 55 % des individus ont effectué leur première approche au niveau de la barrière immergée (antenne AB), contre 45 % à l'entrée de la passe (antenne EP), et aucune différence significative dans les proportions de premières approches n'a été observée (test de χ^2 , $p=0,52$). L'attractivité globale de la passe à poisson est plus élevée que celle de la barrière immergée, avec respectivement 95% et 80% mais aucune différence significative n'est observée (test de χ^2 , $p=0,15$). L'efficacité ajustée de la passe à poisson est de 58% ($N=11/19$ individus) en prenant en compte les 900 mètres de rivière en débit réservé, séparant l'antenne d'entrée de passe de l'entrée effective.

Tableau 6 : Variables comportementales analysées au niveau de la passe à poissons du site de Weweler sur l'Our.

Variable	Passe à poissons	
	Formule	% Total
Taux de montaison	$\frac{N_{ES}}{N_d}$	67%
Taux d'approche	$\frac{N_{AB} + N_{EP}}{N_d}$	67%
Première approche EP		45%
Première approche AB		55%
Attractivité corrigée	$\frac{N_{EP}}{N_{EP} + N_{AB}}$	95%
Efficacité brute	$\frac{N_{SP}}{N_d}$	37%
Efficacité corrigée (1)	$\frac{N_{SP}}{N_{ES}}$	55%
Efficacité ajustée	$\frac{N_{SP}}{N_{EP}}$	58%

- Les individus marqués ont mis entre 3h01 et 895h37 (Temps d'approche médian = 30h32, Figure 25A) pour rejoindre le système d'étude post-déversement. Les individus qui ont réalisé un franchissement de la passe (temps médian d'approche = 28h51) n'ont pas un temps d'approche significativement différent de ceux qui n'ont pas franchi la passe (temps médian d'approche = 62h15) (test de Wilcoxon, $p=0,32$).
- Le temps médian de franchissement complet du système (N=11 sortis du système par SP) est de 43h50 (range : 2h15 - 238h17). Les individus détectés en amont du canal de fuite (P_SB, N=3) ont tendance à prendre un retard (temps médian de franchissement complet = 83h47) par rapport aux individus non détectés au dans le canal (temps médian de franchissement complet = 24h17) mais sans différence significative (test de Wilcoxon, $p=0,28$).
- Pour les individus qui n'ont pas franchi la passe, le temps médian passé dans le système atteint 4h01 (range : 30 minutes - 1110h03) qui n'est pas significativement différent de celui des individus qui ont franchi (test de Wilcoxon, $p=0,97$).
- Pour le franchissement de la passe (900 m de tronçon de rivière entre EP et l'entrée effective de passe + la passe à poissons), le temps médian est de 4h10 (range : 1h38 - 28h10). Aucune différence significative n'a été observée entre les individus non détectés au seuil (P_EP, temps médian = 4h42), les individus détectés au seuil (P_AB, temps médian = 4h11) et les individus détectés dans le canal de fuite (P_SB, temps médian = 3h12) pour le temps de franchissement de la passe (test de Kruskal-Wallis, $p=0,85$).

Le succès de franchissement de la passe à poissons est variable en fonction des catégories de patrons de mobilités des individus avec une efficacité ajustée totale de franchissement de 58% (Figure 25). Les N=4 individus détectés en entrée de passe sans avoir été détectés en aval de la barrière (P_EP) ont un succès de franchissement de 75%. Le succès de franchissement de la passe des N = 8 individus détectés en aval de la barrière sans franchissement de celle-ci (P_AB) est de 62,5%. Les N = 8 individus détectés en amont de la barrière (P_SB) montrent un succès de franchissement de la passe largement inférieur aux autres, avec un taux de 37,5%. Si on

regroupe les individus qui n'ont pas franchi la barrière immergée (N=12, P_EP + P_AB), on observe une différence significative des taux de franchissement de la passe à poissons (test de χ^2 , $p < 0,005$) par rapport aux poissons qui ont franchi la barrière immergée (P_SB).

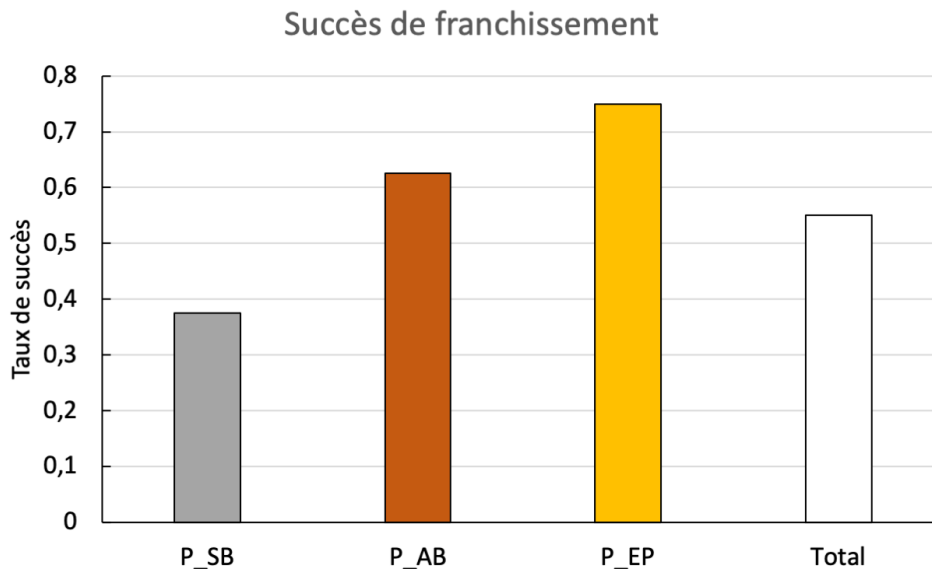


Figure 25 : Taux de franchissement de la passe à poissons par catégories de patrons de mobilité. P_SB : individus détectés en sortie barrière ; P_AB : individus détectés en aval barrière ; P_EP : individus détectés en entrée de passe mais pas en Aval barrière.

Le nombre médian d'approche de l'entrée de la passe à poissons (EP, N=19 ; Figure 26) est de 2 approches (range : 1 à 9 approches) pour les 19 individus détectés au moins une fois en EP. Ce nombre d'approches n'est pas significativement différent (test de χ^2 , $p=0,25$) entre les individus (N=11) qui ont franchi complètement la passe (médiane = 1 approche ; range 1 à 9 approches) par rapport aux individus (N= 8) qui n'ont pas franchi la passe (médiane = 2,5 approches ; range : 1 à 9 approches). Lors de chaque approche, le débit de l'Our n'est pas significativement différent (test de Wilcoxon, $p=0,22$) lorsque l'on observe un franchissement complet de la passe à poissons (médiane = 2,47m³/s ; range = 0,69-6,40 m³/s) ou sans franchissement (médiane = 1,44 m³/s ; range = 0,65-12,29 m³/s).

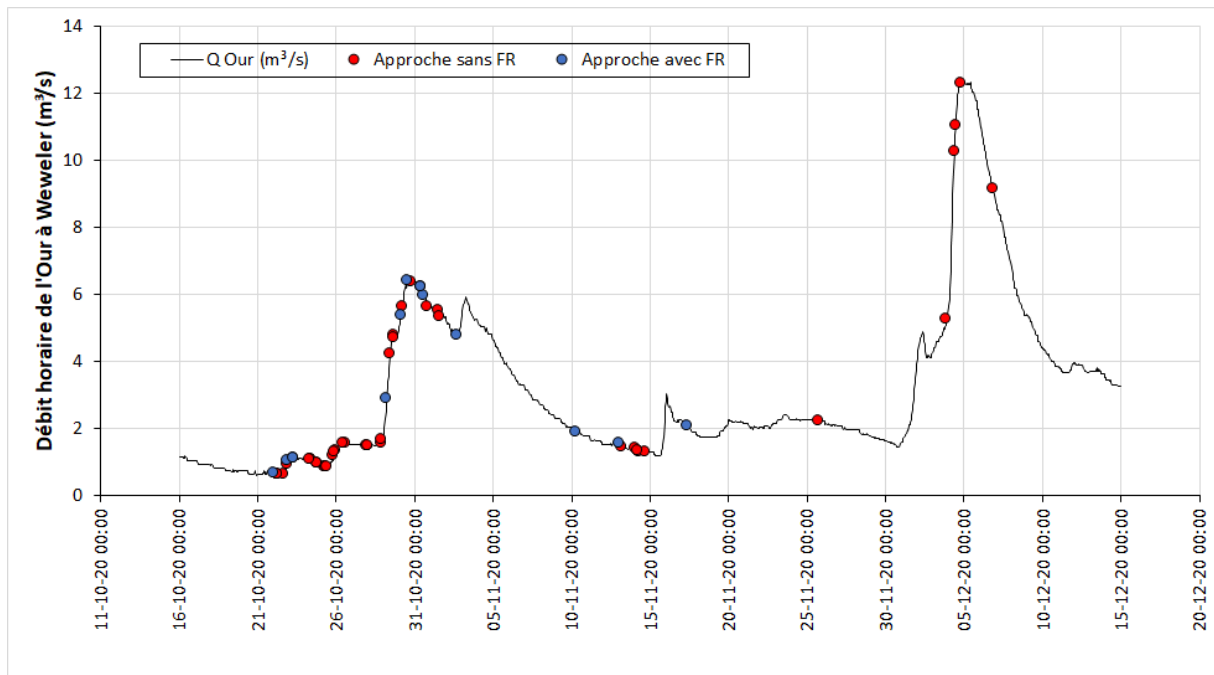


Figure 26 : Données de débits de l'Our à Weweler (m^3/s) lors d'une approche de la passe à poissons (détection en EP) avec un franchissement complet (ronds bleus) et sans franchissement (ronds rouges).

3.6 Franchissabilité de la barrière immergée

Sur la période d'étude, 80% des individus entrés dans le système ont été détectés par l'antenne AB (Tableau 7). La moitié de ces individus ($N=8$) a franchi la barrière immergée et se sont présentés par la suite à l'antenne SB, à l'aval des turbines, ce qui correspond à une franchissabilité ajustée de la barrière immergée de 50%. La répulsivité corrigée de la barrière, qui représente le nombre de poissons détectés dans le système d'étude qui n'ont pas choisi le canal de fuite comme voie de migration, atteint 60%.

Tableau 7 : Variables comportementales liées à la barrière immergée.

Variable	Barrière immergée	
	Formule	% Total
Attractivité corrigée	$\frac{N_{AB}}{N_{AB} + N_{EP}}$	80%
Franchissabilité ajustée	$\frac{N_{SB}}{N_{AB}}$	50%
Répulsivité corrigée	$1 - \frac{N_{SB}}{N_{ES}}$	60%

Pour les $N=16$ individus détectés en AB, le temps médian passé devant la barrière immergée (cumul par individu, Figure 27) est de 24 minutes (range : 33 secondes - 2h19) et aucune différence significative de ce temps n'a été observée (test de Wilcoxon, $p=0,25$) entre ceux qui ont franchi la barrière immergée (médiane = 34 min) et ceux qui n'ont pas franchi la barrière immergée (médiane = 14 min). Quant aux $N=8$ individus qui ont franchi le seuil, le temps médian de présence dans le canal est de 10h11 (range : 20 minutes - 56h33).

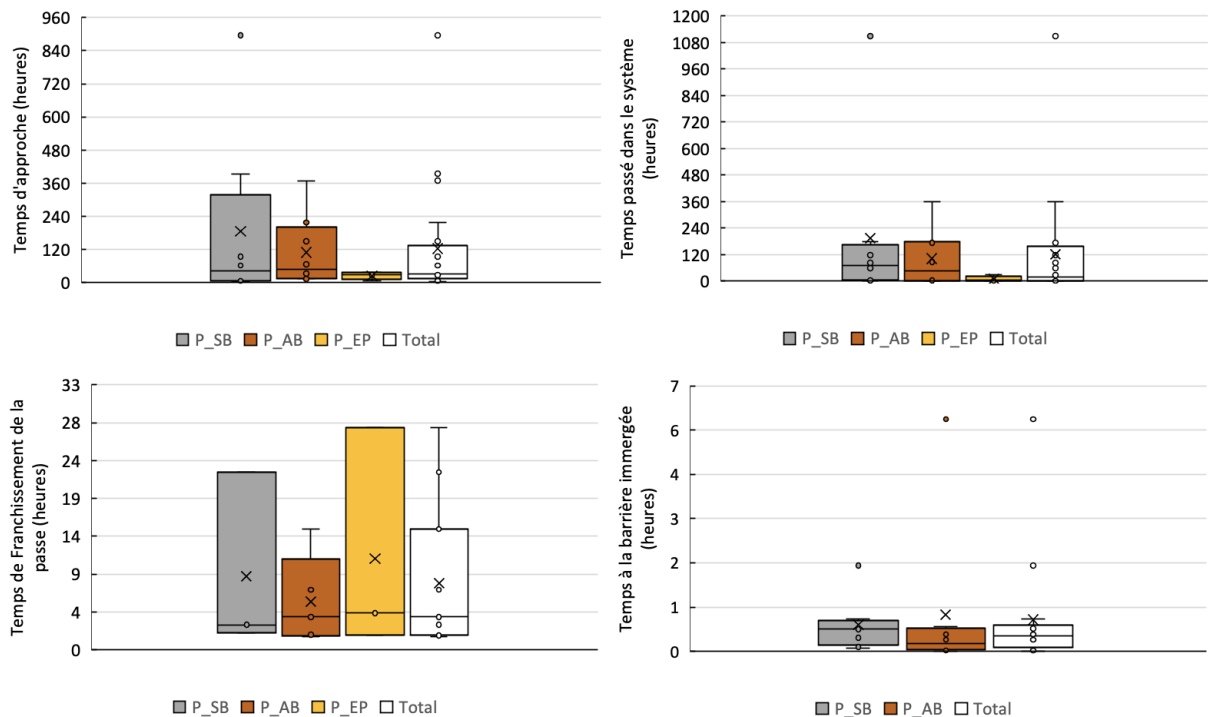


Figure 27 : Temps (en heure) d'approche (A), de franchissement complet (B), de franchissement de la passe (C) et temps passé devant le seuil (D) selon les patrons de mobilité P_SB, P_AB, P_EP. Les boxs comportant des astéris (*) sont significativement différents (t-test, p.value < 0 ,05).

Parmi les N=16 individus détectés en AB (en aval de la barrière immergée), on totalise N=42 approches dont N=10 se sont soldées par un franchissement de la barrière immergée (détection en SB, Figure 28). Sur la totalité des individus qui ont franchi la barrière immergée, 62,5% ont d'abord effectué une à plusieurs approches du seuil avant de le franchir. Le nombre d'approches entre les individus qui ont franchi la barrière et ceux qui n'ont pas franchi la barrière n'est pas significativement différent (test de Wilcoxon, $p=0,44$). Les approches de la barrière immergée qui ont abouti à son franchissement (débit médian = $5,1\text{m}^3/\text{s}$) se sont déroulées à un débit significativement (test de Wilcoxon, $p=0,006$) plus important que celui des approches sans franchissement (débit médian = $1,56\text{m}^3/\text{s}$) (Figure 29). De plus, pour la totalité des individus qui ont exprimé un franchissement de la barrière immergée, on observe une différence significative (test de Wilcoxon, $p=0,017$) de débit de l'Our entre les approches avec franchissement (débit médian = $5,17\text{m}^3/\text{s}$) et les approches sans franchissement (débit médian $1,71\text{m}^3/\text{s}$). Les conditions hydrologiques à la barrière immergée relevées lors de franchissements par la truite sont :

- I) Un débit $Q_{\text{total}} > 2,25\text{m}^3/\text{s}$ (valeur dépassée 48% du temps entre 2012 et 2020, Figures 30 et 31),
- II) Un débit Q_t estimé $>0,95\text{m}^3/\text{s}$,
- III) Une charge minimale (H_{min}) sur le seuil, située entre 8 et 12,5 cm.

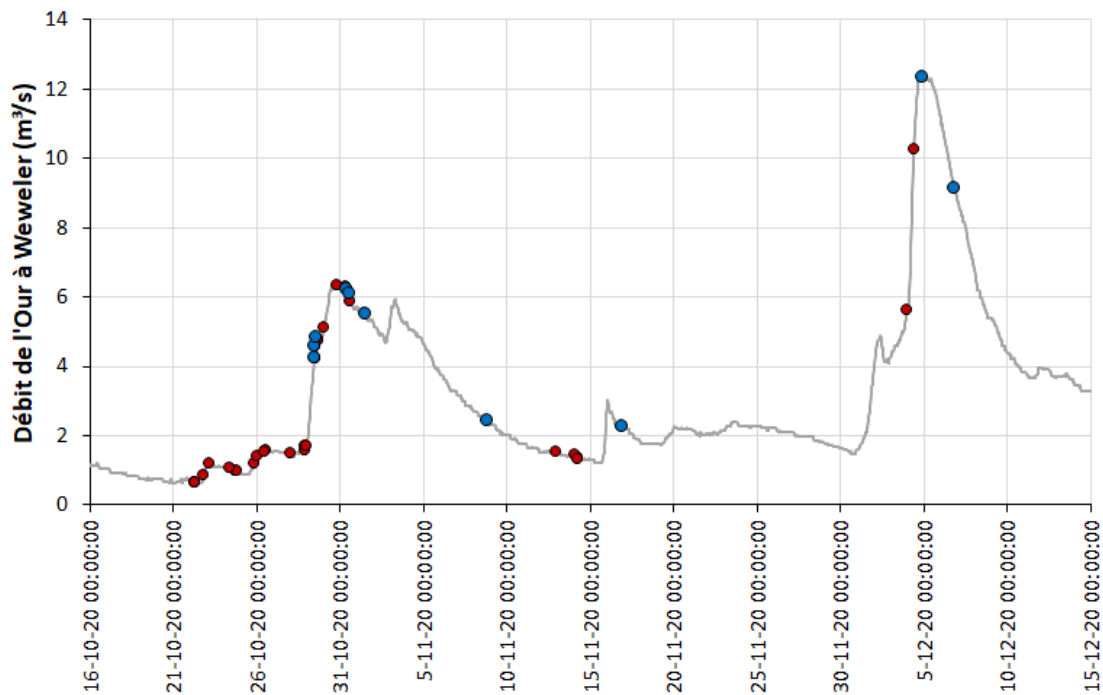


Figure 28 : Données de débits de l'Our à Weweler (m^3/s) lors d'une approche de la barrière immergée (détection en AB) avec un franchissement (détection en SB, ronds bleus) et sans franchissement (ronds rouges).

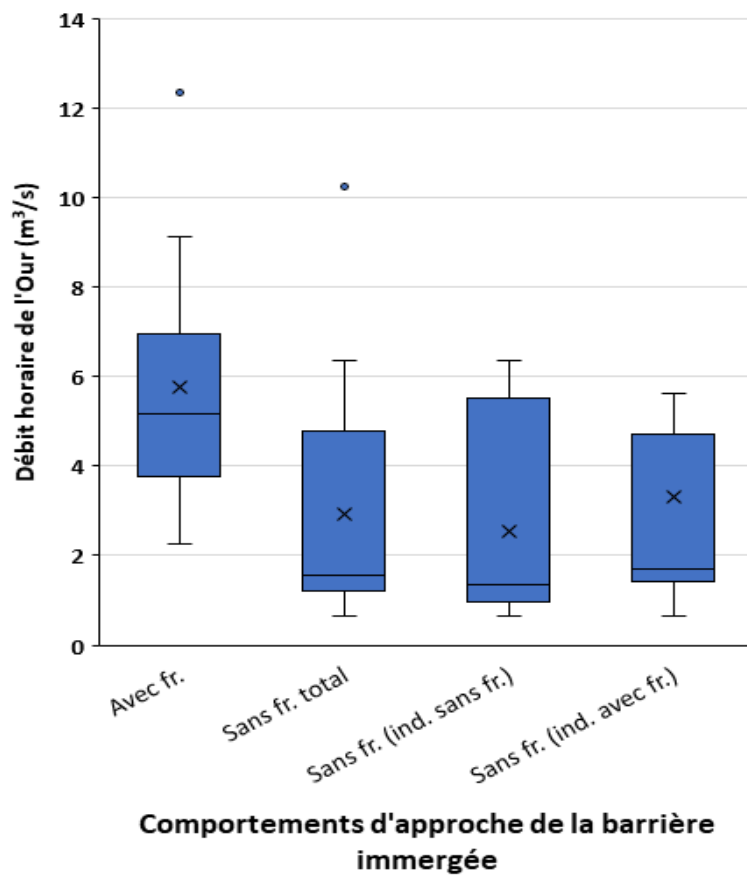


Figure 29 : Distribution des débits horaires Q_{total} (m^3/s) de l'Our lors des approches sans franchissement de la barrière et lors de franchissement de la barrière.

Il est toutefois à souligner qu'en raison du peu de données ponctuelles disponibles et du réglage manuel des turbines de la CHE, le débit turbiné Q_t correspondant aux conditions de franchissement reste difficile à calculer. Il a tout de même pu être estimé à l'aide du ratio moyen entre Q_t et Q_{total} qui est de $0,421 (\pm 0,08)$.

Pour les 8 individus qui ont exprimé un comportement d'approche ($N_{total} = 17$ approches) sur l'antenne AB sans franchissement ultérieur de la barrière immergée, 70,6% ($N=12/17$) des approches ont eu lieu à un débit $Q_{total} < 1,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Par contre, 29,4% ($N=5/17$) de ces comportements ont eu lieu à un débit favorable au franchissement où $Q_{total} > 5,29 \text{ m}^3/\text{s}$, entre le 30/10 et le 31/10.

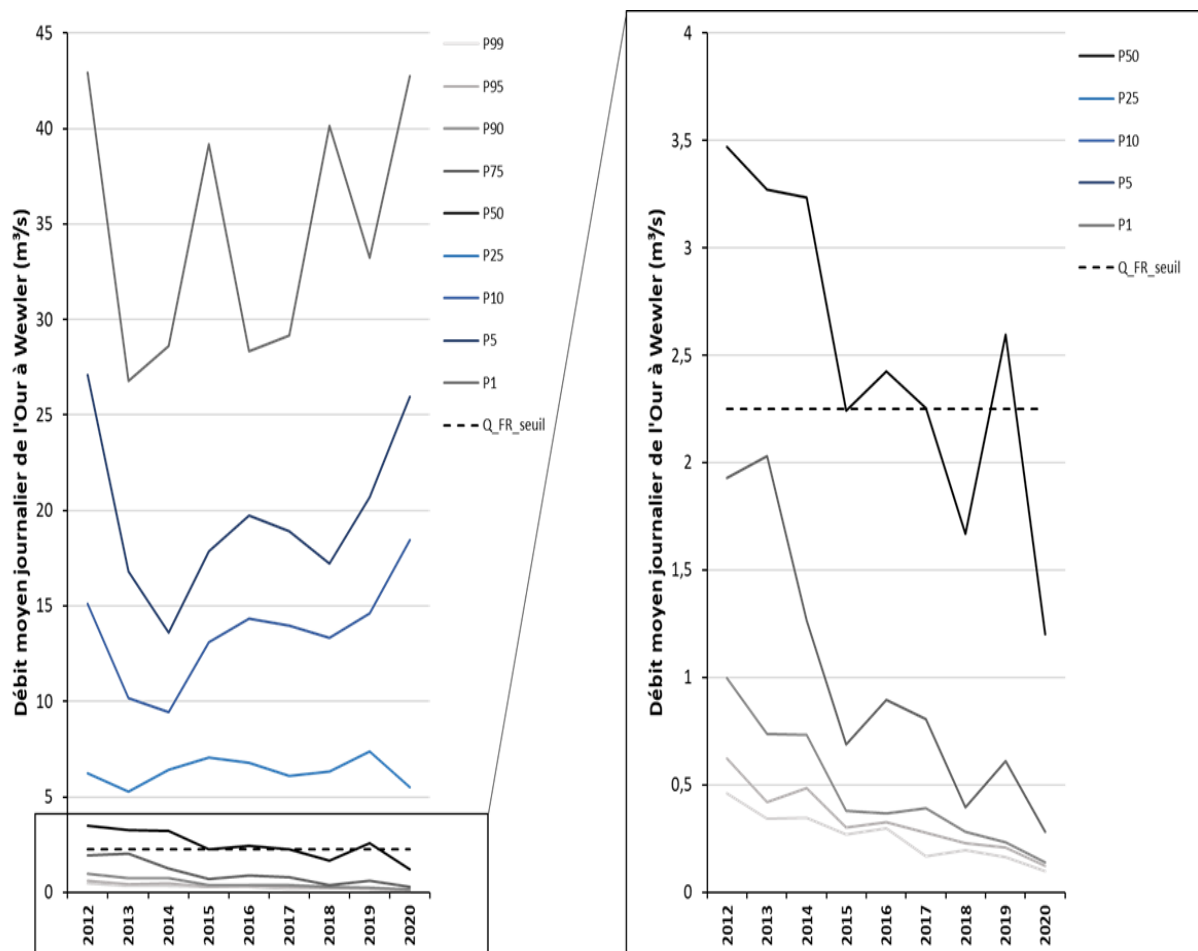


Figure 30 : Données de débits caractéristiques (Percentiles 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 et 99) de l'Our à Weweler (m^3/s) entre 2012 et 2020 par rapport à la limite de franchissement observée à la barrière immergée ($Q_{tot}=2,25\text{m}^3/\text{s}$).

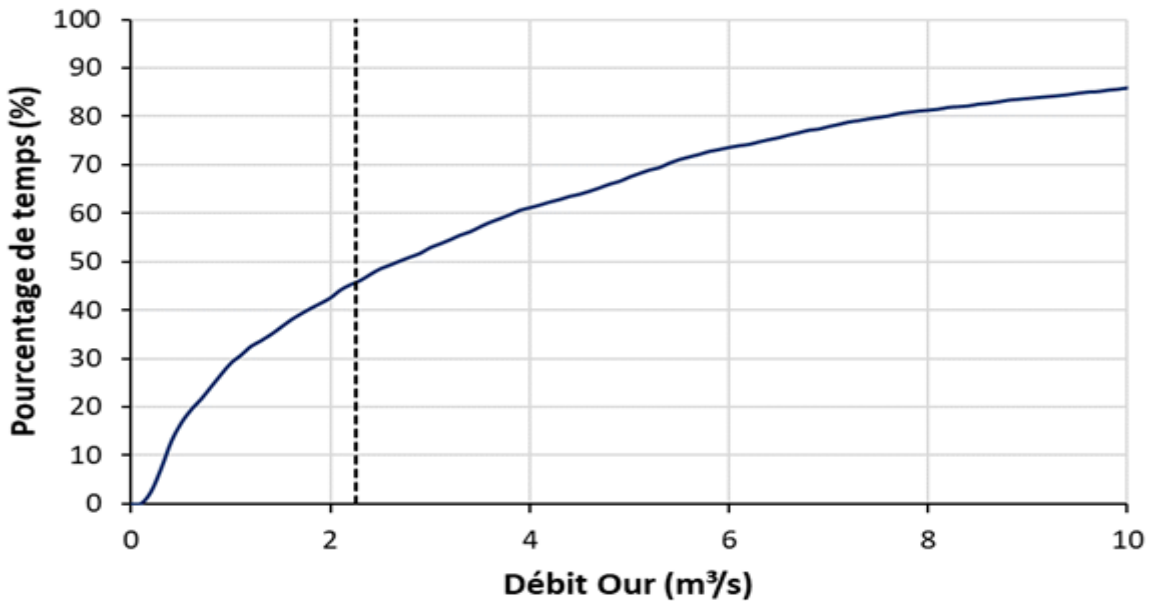


Figure 31 : Courbe totale d'occurrence des débits caractéristiques de l'Our à Weweler (m^3/s) entre 2012 et 2020 par rapport à la limite de franchissement observée à la barrière immergée ($Q_{\text{tot}}=2,25\text{m}^3/\text{s}$).

4. Discussions

4.1 Fiabilité des antennes

Le système de détection installé sur l'Our a fonctionné intégralement du 21/10/2020 à la nuit du 23 au 24/12/2020, date à laquelle une forte crue ($>50\text{m}^3/\text{s}$) a nécessité le démontage du matériel électronique des antennes ES, EP, AB et SB. Lors de cet épisode de crue, l'antenne ES a été détruite et n'a pu être réparée avant la fin de l'étude en raison des débits trop importants. L'antenne SP a également été endommagée et son fonctionnement est resté sub-optimal jusqu'au démontage total du site. Les antennes EP, AB et SB, qui couvraient la confluence ainsi que l'aval des turbines, ont été réinstallées le 29/12. Le système a tourné sur cette configuration réduite jusqu'au démontage total du site le 27/01/2021. On notera en termes d'efficacité de détection, la non détection d'un individu (ID 166) sur les $N=20$ individus détectés en ES mais détectés plus en amont, sans aucune explication car le fonctionnement des antennes est resté optimal.

4.2 Bilan des détections

Le taux de montaison observé est très bon (67%), seul un tiers des individus marqués (33 %) n'ont pas été détectés dans le système d'étude. Sur ces $N=10$ individus, 80% ont été capturés dans l'Ulf avant le marquage. Cependant, aucun paramètre biométrique mesuré ou de marquage (type de tag) ne semble différencier ces poissons non-détectés des individus détectés. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées sur les raisons de ces non-détections.

- I) Il n'est pas impossible que les poissons capturés à l'amont du Weweler-Muhle ont vu leur comportement migratoire altéré par le protocole de marquage (Ovidio et al., 2020) bien que ce type de comportement soit très rarement observé dans le cadre d'autres études impliquant un marquage de ce type. Néanmoins, certains individus semblaient déjà en phase de reproduction. Ces individus n'auraient pas exprimé un comportement de montaison car leur reproduction ayant déjà eu lieu ou ayant été

écourtée suite à leur capture par pêche électrique, ce qui aurait inhibé cet instinct migratoire.

- II) Une mortalité post-marquage pourrait avoir touché un faible pourcentage d'individus. Néanmoins, la méthodologie est identique à celle utilisée lors d'études précédentes par pistage mobile où aucun comportement aberrant, lié à une mortalité post-marquage, n'a été observé (Benitez et al., 2013, Renardy et al., 2020).
- III) Une dérive de fréquence des tags radio utilisés a été relevée récemment par notre équipe française lors d'une étude similaire. Certains tags pourraient donc avoir émis à une fréquence autre que celles écoutées. Cependant, ce genre de dérive reste rare et n'explique pas à elle-seule, la non-détection de 33% des poissons marqués.
- IV) Il ne faut pas exclure la probabilité d'une prédation sur des individus en post-marquage.

Afin d'améliorer le protocole des futurs suivis par radio-télémetrie, il sera nécessaire de multiplier les fréquences d'écoute afin de couvrir une éventuelle dérive de fréquence. L'installation d'une antenne supplémentaire en aval du point de déversement pourrait également être envisagée afin de détecter les poissons qui effectuent un déplacement contraire à celui attendu.

4.3 Barrière immergée : capacité de répulsion

Dans le but de favoriser le choix de la voie de migration équipée d'une passe à poissons, c'est à dire le tronçon de 900m en débit réservé situé juste en aval du barrage de prise d'eau, une barrière immergée installée en sortie du canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Weweler. Habituellement utilisé dans un contexte de dévalaison (Beck et al., 2020), un dispositif de dissuasion lors de la montaison est une approche novatrice. Au cours de cette étude nous avons observé pour cette barrière une attractivité corrigée importante avec 80% des poissons détectés dans le système qui s'en approche. Le taux de franchissement de la barrière immergée sur la période d'étude est de 50% avec la détection au pied des turbines, 150m en amont de la barrière, de N=8 individus sur les N=16 détectés en aval de la barrière immergée. Cependant, la répulsivité corrigée de la barrière, qui représente le nombre de poissons qui n'ont pas utilisé le canal de fuite comme voie de migration est de 60%.

Parmi les 16 individus qui ont été détectés au pied de la barrière immergée, on a totalisé 42 approches de l'antenne AB dont N=10 se sont soldées par un franchissement. Nous n'avons pas observé de différence significative de temps de présence au pied de la barrière entre les tentatives avec et sans succès de franchissement de la barrière. Nous n'avons également pas observé de différence en termes de nombres d'approches entre les individus détectés au pied des turbines ou non. Néanmoins, nous avons constaté que pour la totalité des approches identifiées, il existe une différence significative entre les approches accompagnées par un succès de franchissement et celles sans succès. Le débit médian de l'Our lors du franchissement de la barrière immergée était 3 fois supérieur au débit médian de l'Our lors des approches sans franchissement. Certains individus ont exprimé plusieurs comportements d'approche avant de finalement franchir la barrière immergée et atteindre la zone de rejet des turbines. Pour ces individus, nous avons également observé une différence significative de débit de l'Our entre les approches avec et sans franchissement. Ce résultat indique que lors d'une approche, la décision de franchir la barrière immergée est intimement liée aux conditions de débit de l'Our

et aux conditions hydrologiques qui en découlent. D'après les valeurs des paramètres (charge, profondeur de fosse et hauteur de chute) mentionnés dans guide ICE (Baudoin et al., 2015) et comparées aux mesures in situ, la barrière immergée est franchissable en permanence (probabilité de franchissement = 100%) pour les deux gammes de taille de truite aux différents débits rencontrés pendant l'étude. La valeur de profondeur de fosse (H_f) rend théoriquement infranchissable la barrière immergée jusqu'à une valeur de 30cm de fosse. Néanmoins, des franchissements de la barrière immergée ont été observés à des valeurs de débit inférieures à celles qui engendrent une profondeur de fosse >30 cm. Il serait donc important de vérifier sa franchissabilité réelle selon la méthodologie précise du guide pratique ICE de mesure de la franchissabilité d'un obstacle. Dans le cadre de cette étude de suivis comportementaux lors du franchissement de la barrière par les $N=8$ individus, les conditions hydrologiques favorables au franchissement de la barrière immergées sont :

- I) Un débit $Q_{total} > 2,25\text{m}^3/\text{s}$,
- II) Un débit Q_t estimé $>0,95\text{m}^3/\text{s}$,
- III) Une charge minimale (H_{min}) sur le seuil, située entre 8 et 12,5 cm.

Il est à souligner qu'en raison du peu de données ponctuelles disponibles et du réglage manuel des turbines de la CHE, le débit turbiné Q_t correspondant aux conditions de franchissement reste difficile à calculer dans le cadre de ce suivi. Lors de mesures ponctuelles du Q_t , celui-ci a tout de même pu être estimé à l'aide du ratio moyen Q_t/Q_{Total} qui est de $0,421 (\pm 0,08)$. Ce seuil de $2,25\text{m}^3/\text{s}$ dans l'Our en amont du barrage de Weweler représente néanmoins une valeur de débit fréquemment observée car elle a été dépassée 48% du temps entre 2012 et 2020. Il est important de noter que 5 approches de la barrière immergée ont eu lieu entre le 30 et le 31/10/2020 à un débit Q_{total} largement supérieur ($>5,3\text{m}^3/\text{s}$) aux conditions minimales de franchissabilité ($Q_{total}>2,25\text{m}^3/\text{s}$) et ne se sont pas soldées par un franchissement de la barrière immergée. En effet, le 30/10/2020, les paramètres hydrologiques de la barrière immergée ont été mesurés, le débit Q_t était de $1,9\text{m}^3/\text{s}$ et la charge H moyenne était de 15 cm. Les conditions hydrologiques étaient donc favorables au franchissement de la barrière. La couleur de l'eau du canal de fuite était semblable à celle du débit réservé, il est donc probable que la turbidité n'ait pas influencé le choix de la voie de passage. Par contre le ratio Q_t/Q_c était le plus bas enregistré sur la durée de l'étude avec une valeur de 0,3 (moyenne = $0,421 \pm 0,08$). Ce ratio moins élevé pourrait expliquer le plus grand attrait du tronçon en débit réservé à ces dates de l'étude. La gestion du ratio débit turbiné / débit de la rivière (Q_t/Q_c) pourrait donc s'avérer être un outil d'optimisation de la barrière immergée bien que les données de Q_t soient difficilement exploitables.

4.4 Données pour la passe à poissons

L'attractivité corrigée de la passe à poisson est élevée avec 95% des poissons dans le système qui sont détectés en entrée de passe. Cependant la compétition avec la barrière immergée est forte, avec 55 % des poissons qui se présentent d'abord au niveau de la barrière immergée.

L'efficacité brute de la passe est de 37% des poissons déversés qui franchissent la passe. Cette valeur est bien en dessous de l'objectif de 90 à 100% émis par Lucas et Baras (2001). Néanmoins, cette variable se base sur l'ensemble des poissons déversés, dont une partie n'a pas exprimé de déplacement vers l'amont. Cette altération du comportement migratoire peut être compensée par l'utilisation de l'efficacité ajustée, qui considère uniquement les poissons exprimant un comportement de montaison détectés en entrée de passe (Ovidio et al., 2017) et elle est plus représentative de l'efficacité réelle de la passe. Cette variable atteint une valeur de 55%, ce qui correspond à une efficacité moyenne comparativement à d'autres études en Wallonie. En effet, des valeurs d'efficacité ajustée de passes à poissons de 53%, 86% et 89%

ont été observées en 2018 sur la Vesdre (Ovidio et al., 2020), de 56% en 2015/2016 sur le Bocq au niveau du barrage du Maka (Ovidio et al., 2017) et de 86,3% en 2015/2016 sur la Meuse au niveau du barrage de Monsin (Benitez et al., 2018) et de 53,6% et 92,3% sur l'Eau Noire (Sonny et al., 2020). Néanmoins il faut prendre en compte qu'il reste près de 900 m de rivière en situation de débit réservé, à parcourir avant d'atteindre l'entrée de passe effective et qu'il existe certainement sur ce tronçon des zones d'habitats de reproduction potentielles. En termes d'influence du débit de l'Our sur la franchissabilité de la passe à poissons, aucune tendance significative n'a été observée quant à la réussite ou non du franchissement de la passe lors de son approche.

Enfin le franchissement de la barrière immergée engendre une diminution significative du franchissement de la passe à poissons. Parmi les 8 individus détectés au pied du rejet des turbines, 150m en amont de la barrière immergée, seuls 3 individus ont dévalé puis franchi le barrage de Weweler par la passe à poissons. Ce résultat indique que la probabilité de franchissement de la passe à poissons et donc d'atteindre les habitats disponibles situés en amont du barrage de Weweler est significativement plus faible après une tentative de recherche de voie de passage par le canal de fuite de la centrale hydroélectrique.

5. Conclusions et recommandations

Cette étude démontre que le caractère infranchissable de la barrière immergée installée sur l'Our au niveau du site du Weweler-Muhle n'est pas suffisant pour la truite, en l'occurrence durant cette étude, lors de sa période de reproduction. De plus, le débit turbiné montre une attractivité compétitive importante (55%) sur le bras principal de la rivière qui mène à la passe à poissons. Il a été observé que les truites marquées qui ont effectué un aller/retour dans le canal de fuite voient leur succès de franchissement de la passe diminuer. Ces individus prennent également un retard significatif sur les poissons qui n'ont pas été attiré par la barrière immergée. Bien que 60% des individus marqués et détectés dans le système n'ont pas utilisé le canal de fuite comme voie de migration, l'effet répulsif de la barrière immergée n'est pas optimal. Il semble donc que l'installation d'une barrière immergée fixe comme celle installée sur le site du Weweler-Muhle soit une option potentiellement transposable pour d'autres sites au contexte similaire. Cependant, une diminution de son attractivité via la gestion du ratio débit turbiné/débit disponible ainsi qu'une diminution de la franchissabilité de l'obstacle via un meilleur dimensionnement (augmentation du delta H) semblent essentielles. En variante de cette solution, le recours à des barrières électriques immergées peut apporter une efficacité plus importante pour un coût possiblement réduit sur les sites de plus grande importance. C'est en effet dans une application de blocage à la montaison que les barrières électriques sont les plus efficaces et approchent 100% (Johnson et al. 2014).

Pour la passe à poissons, la mesure de son efficacité ajustée est de 55%. Bien que le dispositif de détection qui a permis cette mesure, prend en compte le franchissement des 900m de rivière en débit réservé, l'efficacité ajustée de la passe n'est pas optimale. Elle pourrait être améliorée par exemple, en augmentant également ce ratio turbiné et débit réservé. Enfin une analyse de l'efficacité spécifique à la passe à poissons, permettrait d'identifier si son taux d'efficacité est lié au passage par les 900m de débit réservé et/ou à la structure de la passe en elle-même.

Enfin, il est important de mentionner que le modèle biologique, la truite commune, représente parmi les espèces présentes dans l'Our (autres principales : barbeau, chevaine, vandoise, goujon, vairon et chabot) l'espèce qui possède les meilleures capacités de nage et de saut, donc la meilleure capacité de franchissement de la barrière immergée. Inversement pour la passe à poissons, les résultats de franchissement pourraient s'avérer moins bons pour des espèces avec de moins bonnes capacités de nage.

6. Références

- Baudoin, J.M., Bergun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P. and Voegtle, B. (2015) Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application, Onema.
- Baras, E., & Lucas, M. C. (2001). Impacts of man's modifications of river hydrology on the migration of freshwater fishes: a mechanistic perspective. *International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology*, 1(3), 291-304.
- Beck, C.; Albayrak, I.; Meister, J.; Peter, A.; Selz, O.M.; Leuch, C.; Vetsch, D.F.; Boes, R.M. Swimming Behavior of Downstream Moving Fish at Innovative Curved-Bar Rack Bypass Systems for Fish Protection at Water Intakes. *Water* 2020, 12, 3244. <https://doi.org/10.3390/w12113244>
- Benitez, J. P., Dierckx, A., Brédart, D., Grandry, L., Hanzen, C., & Ovidio, M. (2013). Caractérisation des comportements de dévalaison et de montaison de poissons migrateurs en vue d'une optimisation et d'une conception des dispositifs de franchissement sur deux sites hydroélectriques de l'Amblève.
- Benitez JP, Dierckx A, Nzau Matondo B, Rollin X, Ovidio M (2018) Movement behaviours of potamodromous fish within a large anthropised river after the reestablishment of the longitudinal connectivity. *Fish Res* 207:140–149
- Clay, C. H. 1995. Design of fishways and fish facilities. Second edition. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA.
- Cooke, S. J., & Hinch, S. G. (2013). Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice. *Ecological Engineering*, 58, 123-132.
- Garcia de Leaniz, C., 2008. Weir removal in salmonid streams: implications, challenges and practicalities. *Hydrobiologia* 609, 83–96.
- Gregory, S., Li, H., Li, J., 2002. The conceptual basis for ecological responses to dam removal. *Bioscience* 52, 713–723.
- Johnson, N.S.; Thompson, H.T.; Holbrook, C. & Tix, J.A. 2014. Blocking and guiding adult sea lamprey with pulsed direct current from vertical electrodes. *Fish res* 150 : 38-48.
- Lucas, M.C., Baras, E., 2001. Migration of Freshwater Fishes. Fishing News Books, Blackwell Science Ltd., Oxford.
- Ovidio M, Sonny D, Dierckx A, Watthez Q, Bourguignon S, de le Court B, Detrait O, Benitez JP (2017) The use of behavioural metrics to evaluate fishway efficiency. *River Res Appl* 33(9):1484–1493.
- Ovidio M, Sonny D, Watthez Q, Goffaux D, Detrait O, Orban P, Billy Nzau Matondo, Renardy S, Dierckx A, Benitez JP (2020) Evaluation of the performance of successive multispecies improved fishways to reconnect a rehabilitated river. *Wetlands Ecol Manage*.

Piper, A.T., Wright, R.M., Kemp, P.S., 2012. The influence of attraction flow on upstream passage of European eel (*Anguilla anguilla*) at intertidal barriers. *Ecol. Eng.* 44, 329–336.

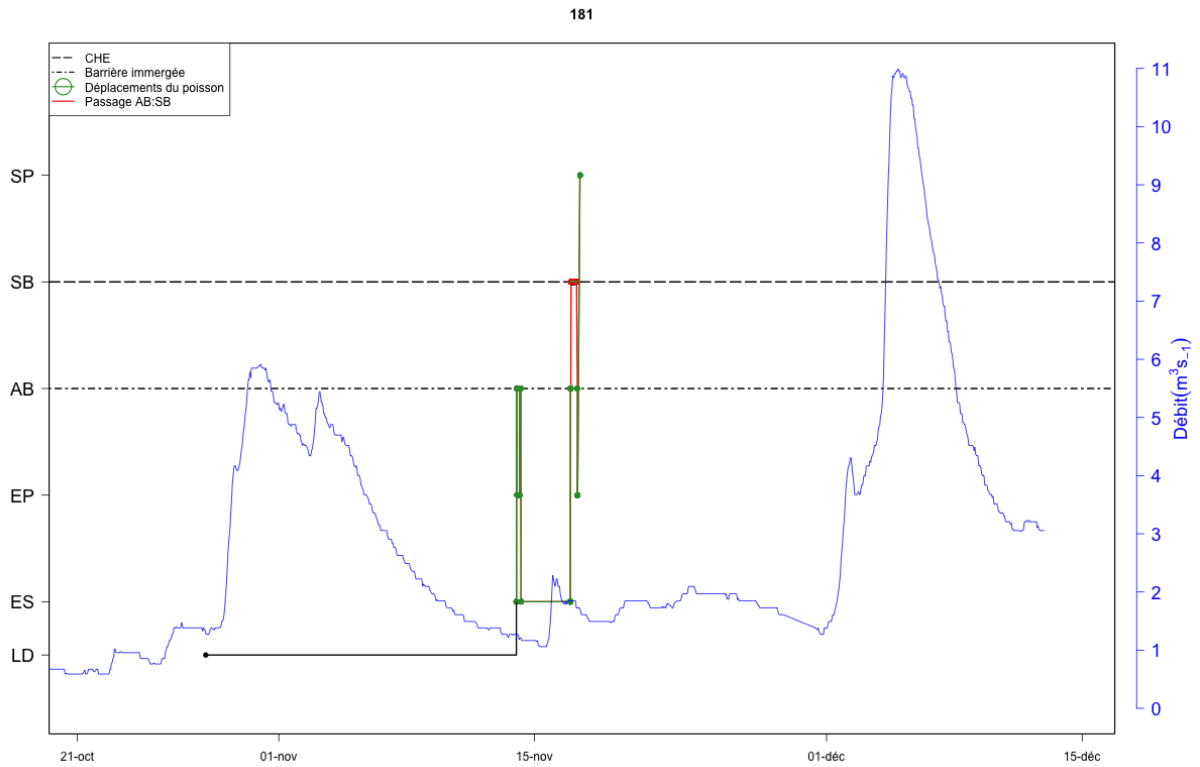
Renardy, S., Benitez, J. P., Tauzin, A., Dierckx, A., Matondo, B. N., & Ovidio, M. (2020). How and where to pass? Atlantic salmon smolt's behaviour at a hydropower station offering multiple migration routes. *Hydrobiologia*, 847(2), 469-485.

Silva, A. T., et al. 2018. The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19:340–362.

Sonny, D., Colson, D., Wathez, Q., Ovidio, M., & Benitez, J. P. (2020). Évaluation de l'efficacité des passes à poissons du barrage de Nismes et de la Foulerie sur l'Eau Noire. Rapport d'expertise, 28 pages.

7. Annexes

7.1 Patrons de mobilité



6

