
Rapport de stage individuel 4^{ème} année

Suivi des migrations holobiotiques à l'aide d'un
piège photo (Vaki Riverwatcher®) dans un cours
d'eau de la Mayenne : Le Vicoin

Entreprise : Syndicat JAVO

Adresse : 5 rue du Pays de Loiron La Chapelle du
Chêne, 53 320 Loiron-Ruillé



Tuteur entreprise :
Nicolas Boileau
Technicien de rivière

Tuteur académique :
Catherine Boisneau
Professeure et chercheure

Etudiant :
Pao Canu
IMA
2022-2023

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction générale	5
1.1	Présentation de la structure d'accueil	5
1.2	Présentation de la mission du stage	6
1.3	Présentation des livrables	6
1.4	Retour réflexif sur l'expérience.....	7
1.5	Remerciements.....	7
2	Suivi des migrations holobiotiques à l'aide d'un vidéo compteur (Riverwatcher®) dans un cours d'eau de la Mayenne : Le Vicoin.....	8
2.1	Introduction.....	8
2.2	Matériel et méthode	9
2.2.1	Site d'étude.....	9
2.2.2	Matériel et outils	12
2.2.3	Méthodologie	15
2.2.4	Analyse statistique préalable.....	20
2.3	Résultats	21
2.4	Discussion	30
2.5	Conclusion	36
	Annexes	37
	Bibliographie.....	42

TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Représentation cartographique du secteur du Syndicat Javo dans le département de la Mayenne (D'après Camille Mineau)	5
Figure 2 - Représentation cartographique du bassin versant du Vicoin (@CANU Pao sur QGIS®)	9
Figure 3 - La passe à poisson au moulin du Bas Coudray (@CANU Pao ; GoogleMaps®)	11
Figure 4 - Schéma explicatif du principe d'une passe à poisson à bassins successifs (Morin, 2017)	11
Figure 5 - Illustration du fonctionnement de la passe à poisson (@FishPass)	12
Figure 6 - Illustration du fonctionnement des diodes (@CANU Pao)	12
Figure 8 - Installation du Riverwatcher (@Syndicat JAVO)	13
Figure 8 - L'ordinateur fixe, lié au Riverwatcher sur lequel il est possible d'extraire les données (@CANU Pao).....	13
Figure 9 - Mise en place du Riverwatcher à l'entrée de la passe à poisson au Genest-Saint-Isle (@Syndicat JAVO)	13
Figure 10 - L'interface du logiciel Winari® (@CANU Pao).....	14
Figure 11 - Arbre décisionnel pour l'analyse (@CANU Pao)	15
Figure 12 - Tableau Excel sur lequel les données de l'évènement sont inscrits	16
Figure 13 - Comparaison des températures de l'eau calculées et mesurées	18
Figure 14 - Régression linéaire de la température calculée par la température mesurée	19
Figure 15 - Phénologie des déplacements de poissons (sans distinction d'espèces).....	22
Figure 17 - Phénologie des déplacements du Brochet (N=50)	23
Figure 16 - Phénologie des déplacements de la Brème (N=248)	23
Figure 18 - Phénologie des déplacements de la perche (N=42)	24
Figure 19 - Proportion de dévalaison et de montaison des passages de poissons dans la passe	24
Figure 20 - Mise en relation pour l'année 2022 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit	26
Figure 21 - Mise en relation pour l'année 2021 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit	27
Figure 22 - Mise en relation pour l'année 2020 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit	27
Figure 23 - Mise en relation pour l'année 2022 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit	27
Figure 24 – Pourcentage d'abondance des poissons par cycle lunaire	28
Figure 25 - Pourcentage d'abondance des poissons discriminé par leur proximité à la pleine lune ou à la nouvelle lune	29
Figure 26 - Evolution du débit moyen sur le Vicoin au bas Coudray (estimé 1985-2015) et débits caractéristiques (Morin, 2017)	31
Figure 27 - Représentation de la photopériode et de l'abondance sur une année (2021)	33

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Débits au moulin du Bas Coudray (Morin, 2017).....	10
Tableau 2 - Le choix des variables environnementales principales et secondaires.....	17
Tableau 3 - Site internet utilisés dans le cadre de ce stage	17
Tableau 4 - Différences entre les jours enregistrés et étudiés après suppression des débits limitants et des incertitudes du Riverwatcher.....	19
Tableau 5 - Résultats des tests de Shapiro-Wil afin de tester la normalité des variables	20
Tableau 6 - Abondance pour chaque espèce en fonction de l'année	21
Tableau 7 - Résultats des tests de Spearman (les variables grisées sont considérées comme significatives)	25
Tableau 8 - Résultats du test GLM	25
Tableau 9 - Résultats du modèle de critère d'information d'Akaike (AIC).....	26
Tableau 10 - Résultats des tests de Khi2 (les variables grisées sont considérées comme significatives)	29

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 - Jours supprimés lors de la mise en forme de la base de données	37
Annexe 2 - Représentation cartographiques des deux bassins versants étudié dans le cadre du stage	40

1 Introduction générale

Dans le cadre du cursus scolaire de Polytech Tours, un stage de minimum 3 mois est obligatoire afin de valider la 4^{ème} année. Ce stage a été effectué en Mayenne au sein du syndicat de rivière JAVO assisté de Nicolas BOILEAU et Yohann LUCAS, les deux techniciens du syndicat et suivi par Catherine BOISNEAU professeure et chercheuse à l'Ecole Universitaire Polytechnique de Tours.

1.1 Présentation de la structure d'accueil

Le syndicat JAVO est présidé par Louis MICHEL et assisté de 4 vice-présidents formant le bureau. Les orientations sont décidées par un comité syndical constitué de 27 délégués répartis sur le territoire du JAVO. Le pôle technique est constitué de deux salariés à plein temps : Nicolas BOILEAU et Yohann LUCAS, tous deux techniciens de rivières. Le volet administratif est assuré par deux salariés à temps partiels Aurélie DENIAU, secrétaire du Syndicat et Maxime LE LAY, comptable du syndicat.

Durant la période de ce stage, deux autres stagiaires étaient présents au syndicat. Florian LACROIX travaille sur la réalisation et l'analyse de manipulation I2M2 sur le territoire du JAVO afin d'évaluer des travaux de restauration de cours d'eau. Camille MINEAU chargé d'une étude des zones à enjeux vis-à-vis des écoulements hydrauliques et de la qualité de l'eau visant une aire d'alimentation en eau potable sur le bassin versant du Vicoin (figure 1).

Le secteur du Syndicat Javo dans le département de la Mayenne

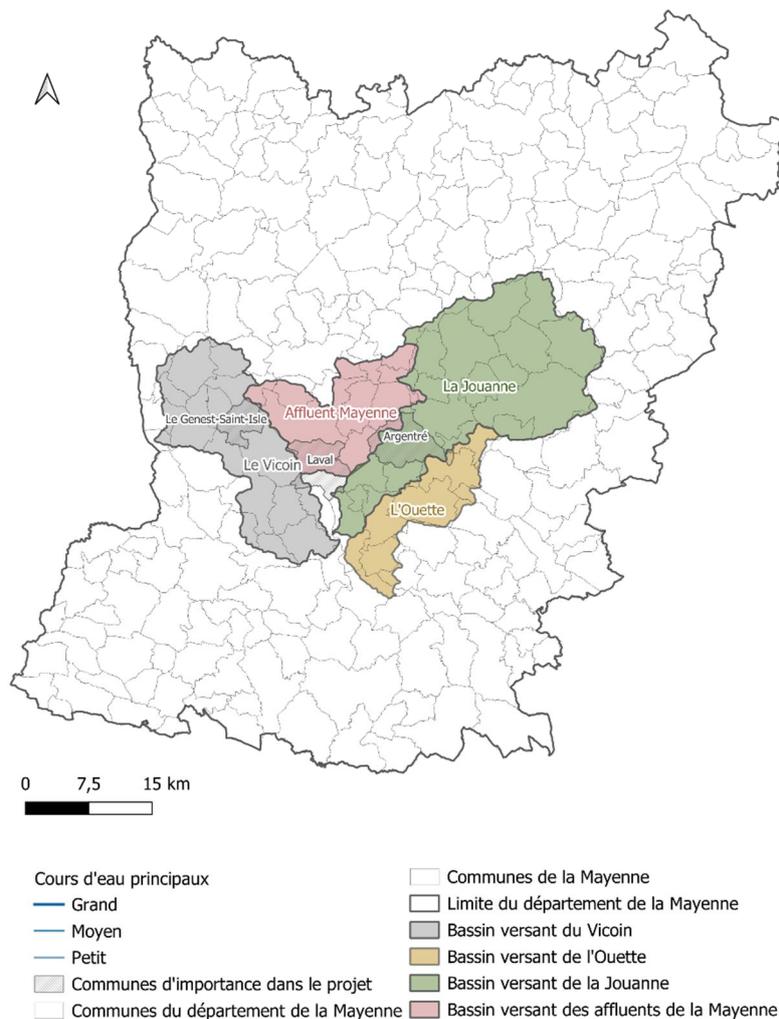


Figure 1 - Représentation cartographique du secteur du Syndicat Javo dans le département de la Mayenne (D'après Camille Mineau)

Le syndicat du JAVO regroupe depuis le 18 décembre 2018 les syndicats de la Jouanne, du Vicoin et de l'Ouette. Il intègre également l'ensemble des affluents de la Mayenne sur le territoire de Laval Agglomération. Le Syndicat exerce sur ce territoire la double compétence GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). La GEMAPI a été rendue obligatoire par la loi de Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d’Affirmation des Métropoles (MAPTAM) du 27 janvier 2014. Elle impose aux collectivités d'exercer des actions soit de leur propre chef soit en transmettant les compétences à une structure porteuse en charge de réaliser ces actions par transfert de compétences. Ces actions entreprises dans ce cadre sont définies par l'articles L.211-7 du code de l'environnement. Le syndicat JAVO a été créé pour remplir ce rôle et a récupéré les 4 items obligatoires de la GEMAPI :

- De l'aménagement des bassins versants
- De l'entretien et de l'aménagement des cours d'eau, canaux, lac et plans d'eau
- De la défense contre les inondations et contre la mer (le cas échéant)
- De la protection et la restauration des zones humides

Concrètement, le syndicat surveille, entretient, gère, restaure et crée tous les types de milieux aquatiques de son secteur.

1.2 Présentation de la mission du stage

Ce stage a été organisé autour de trois missions :

1. Suivre les migrations holobiotiques à l'aide d'un Vidéo-compteur (Vaki RiverWatcher®) sur le Vicoin. Le but étant de mettre en relation les passages de poissons avec des variables environnementales sélectionnées après une recherche bibliographique.
2. Analyser l'impact de la restauration d'un tronçon de cours d'eau de la Jouanne réalisée à l'aide d'une étude de modélisation via le logiciel HABBY. L'objectif de ce travail était d'évaluer le peuplement des poissons (IPR) et des invertébrés (I2M2/IBGN) en réponse aux travaux.
3. Suivre les activités du Syndicat et assister les techniciens dans leur travail durant la période du stage

1.3 Présentation des livrables

Pour la première mission du stage (1), la finalité était de réaliser l'analyse des données du vidéo-compteur de début novembre 2019 à fin mai 2023 et, le cas échéant, de valoriser les résultats en les publiant dans une revue à comité de lecture. Cet article ne sera pas terminé au moment du rendu de ce rapport de stage et ne sera donc pas présenté en annexe. Il s'inspirera cependant des éléments développés plus loin dans ce document.

Pour la deuxième partie (2), était attendu un rapport concis expliquant le but de la restauration et précisant les modalités de réalisation. Dans un second temps, une évaluation des populations piscicoles et macrobenthiques et une comparaison entre l'année N et N+1 sera réalisée le cas échéant.

Pour la troisième partie du stage (3), aucun rapport n'était demandé au sujet des activités suivies lors de la période du stage n'ayant pas de lien direct avec les deux missions principales. Pour illustrer l'aspect découverte des activités au sein du syndicat un tableau concis met en avant toutes ces interventions : La date, des photos, la réalisation et ce qui en est ressorti.

Les deux dernières parties ne peuvent apparaître dans ce document par manque de place, elles seront donc uniquement transmises au tuteur académique.

1.4 Retour réflexif sur l'expérience

L'expérience fut très enrichissante car, conjointement à mon projet personnel, il m'a été possible de travailler sur différents programmes de suivi et de constater la diversité des projets susceptibles de concerner un syndicat de rivière : restauration, prévention des inondations, suivis écologiques, réunions ...

1.5 Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier chaleureusement Nicolas Boileau et Yohann Lucas, pour leur aide, leurs conseils et leur temps tout à long de la période du stage. Merci également à Catherine Boisneau pour son aide et sa disponibilité durant ce stage. Merci enfin à Florian Lacroix et Camille Mineau pour leur amitié et leur collaboration durant cette période.

2 Suivi des migrations holobiotiques à l'aide d'un vidéo compteur (Riverwatcher®) dans un cours d'eau de la Mayenne : Le Vicoin.

2.1 Introduction

La politique de fragmentation des habitats via la création de barrages ou de seuils a commencé dès le Moyen Âge et a fortement augmenté lors de la révolution industrielle en France et à l'étranger. Cette politique d'aménagement a engendré de nombreuses problématiques hydrologiques, écologiques et sociales (Magilligan et al., 2016 ; Bordes, 2010). En termes hydrauliques, les ouvrages transversaux contribuent à une baisse des vitesses en amont et une accélération en aval (Baxter, 1977). Du point de vue géomorphologique, cette modification des vitesses et la fragmentation induite par les ouvrages conduisent à une modification du substrat à l'amont par des processus de sédimentation et de colmatage. A contrario, en aval, des processus d'érosions de fond et d'érosions latérales occasionnent une incision du fond du lit et un élargissement des berges (Kondolf, 1997 ; Skalak et al., 2013 ; Beauchamp et al. 2017). En termes physico-chimiques, la succession de zones lenthiques contribue à augmenter la température de l'eau et à diminuer l'oxygénation. Ces deux conséquences associées à la sédimentation peuvent conduire à des phénomènes d'eutrophisation du milieu (Seyedhashemi et al., 2021) et ce, même dans le cas de barrages de petites tailles (Chandesris et al., 2019). En termes de fonctionnalité écologique, la fragmentation des cours d'eau empêche le transit des sédiments et le déplacement des organismes biologiques (Helms et al., 2011 ; Benitez et al., 2022 ; Prunier et al., 2023).

Pour exemple, l'ichtyofaune a besoin de se déplacer pour effectuer son cycle de vie : recherche de nourriture, de partenaires, de zones pour se reproduire, de refuges, etc (Vowles & Pompeu, 2012 ; Benitez et al., 2015). Cette fragmentation perturbe fortement ces dispersions en amplifiant le coût énergétique nécessaire pour le déplacement des espèces (Pedraza & De Roos, 2021) ou en les rendant impossible. Il en résulte une perte de diversité génétique sur les tronçons cloisonnés (Weibel & Peter, 2013 ; Lamouroux & Cattané, 2006), une diminution numérique des espèces (Gido et al., 2016), une modification des communautés piscicoles (Poulet, 2007 ; Vigneron & Oberdoff, 2010) et une réduction de la richesse spécifique (Peter, 1998). La fragmentation est reconnue avec l'introduction d'espèces allochtones comme la principale menace pour le maintien de la biodiversité piscicole (Su et al., 2021).

Pour pallier cette problématique, une politique de restauration de la continuité s'est progressivement mise en place en Europe avec la Directive Cadre sur l'Eau en 2000 ayant pour objectif majeur de réhabiliter la fonctionnalité des cours d'eau (Weibel & Peter, 2013). Le démantèlement, la création de rivières de contournement ou l'installation de passe à poissons ont permis, dans certains cas, d'améliorer l'état écologique générale en présentant une rapide amélioration de la continuité piscicole et sédimentaire (Van Looy et al., 2014 ; Le Hingrat & Boileau, 2021b). Elle a permis également d'améliorer la connectivité génétique au sein des masses d'eau (Prunier et al., 2023).

Sur le Vicoin, 18 ouvrages hydrauliques transversaux de type clapets oscillants et seuils bétonnés, pour partie associés à des moulins, étaient présents sur l'ensemble du linéaire (1 obstacle tous les 1,4 km en moyenne). Ceux-ci ont été totalement effacés ou rendus franchissables depuis 2008 grâce à une importante politique de restauration de la continuité (Le Hingrat & Boileau, 2021b). Dans le cadre de cette restauration de la continuité, une passe à poissons à bassins successifs a été installée sur le site du Bas Coudray, commune du Genest St Isle. Cette installation a été équipée d'un dispositif de vidéo comptage dont l'objectif est d'étudier et de décrire les déplacements piscicoles afin de les mettre en lien avec certaines variables abiotiques.

2.2 Matériel et méthode

2.2.1 Site d'étude

Le Vicoin est un cours d'eau affluent de la Mayenne présentant un linéaire de 46,7km et un bassin versant de 235km². Il prend sa source au nord du territoire du Bourgneuf-la-Forêt et de la Baconière. Il se jette en rive droite de la Mayenne sur la commune de Nuillé-sur-Vicoïn (figure 2 ; (Morin, 2017)).

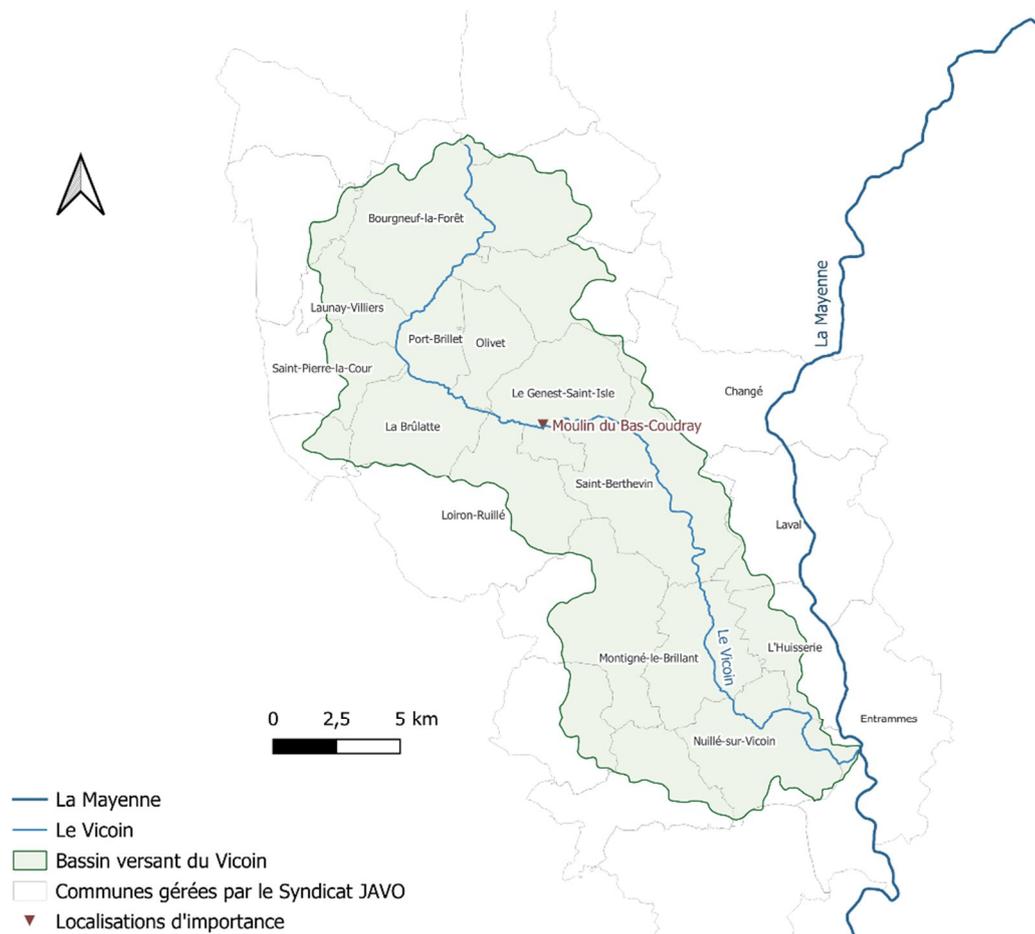


Figure 2 - Représentation cartographique du bassin versant du Vicoin (@CANU Pao sur QGIS®)

Le Vicoin présente une hydrologie très fluctuante avec des étiages sévères pouvant chuter jusqu'à 0,012 m³/sec et des crues importantes allant jusqu'à 37,4 m³/s pour son Q50 (Morin, 2017). Le module du Vicoin est de 0,9m³/sec. Ces valeurs sont calculées pour le site du Bas Coudray et extrapolées depuis la station hydrométrique de la DREAL basée à Nuillé Sur Vicoïn (Tableau 1).

Tableau 1 - Débits au moulin du Bas Coudray (Morin, 2017)

Occurrence	Débit (m ³ /sec)
Q _{MNA} 5	0.02
Etiage	0.1
Module	0.9
2 x Module	1.8
Q inter	5
Q2 ans	14.7
Q5 ans	21.8
Q10 ans	26.5
Q20 ans	31.2
Q50 ans	37.4

L'occupation du sol présente 5,5% de zones urbanisées et 10% de zones forestières. La surface agricole utile est dominée par la présence de cultures (43,2%) et de prairies (40,6%). Cette distribution est relativement homogène sur le bassin versant. Le Vicoin est un cours d'eau disposant d'une forte densité de plan d'eau en amont (1,8 plan d'eau/km²) (Le Hingrat & Boileau, 2021), son hydrologie et sa géochimie en sont donc impactées avec comme principale conséquence une sur-évaporation et une forte contribution au réchauffement de l'eau.

De plus, la ripisylve du Vicoin, tout comme celle de la Jouanne, est menacée par la présence du parasite *Phytophthora alni* qui provoque une forte mortalité de l'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*) (Boileau & Larivière, 2016), une espèce constituant plus de 65 % de la ripisylve (Hydro Concept, 2019). Avec un taux de mortalité de l'aulne de près de 45 % sur le Vicoin en 2019 et de 17 % (Boileau, données non publiées).

Le site d'étude se situe au niveau du moulin privé du Bas Coudray sur la commune du Genest saint Isle. Le moulin dispose d'un droit validé par les services de l'état en 2014. L'étude d'aménagement s'est orientée en 2015 vers la création d'une passe à bassins successifs afin de rétablir la continuité piscicole et le maintien des ouvrages existants afin de garder la capacité de dérivation de l'eau pour l'exploitation de la force motrice par le moulin. En 2018, il a été décidé de créer cette passe à poissons en génie civil le long du déversoir. La continuité sédimentaire est rétablie en réalisant des écourues en période hivernale par arrêté préfectoral. Cette passe à poissons n'est pas conçue pour le franchissement des anguilles. Une seconde passe spécifique est mise en place avec un tapis brosse pour optimiser la migration des anguillettes. L'exutoire de cette passe se fait dans le canal usinier du moulin.

Le moulin du Bas Coudray a été créé initialement afin d'utiliser l'énergie hydraulique du Vicoin. Le site se divise en deux bras (figure 3) :

- Le bras en rive gauche est le Vicoin (1). Il correspond au « bras de décharge » et est constitué d'un ouvrage de répartition. Ce clapet est automatisé pour permettre la régularisation des hauteurs d'eau en débit normal. Les sondes de gestion sont calées pour alimenter en permanence la passe à poissons. Le débit supplémentaire peut soit être prélevé par le moulin et/ou conservé dans le Vicoin par surverse par-dessus le clapet. Dans le fonctionnement général, la passe à poissons est prioritaire sur l'ensemble des prélèvements pour conserver le DMR (90L/s).
- Le bras en rive droite constitue le « bras usinier » (2), qui permet d'alimenter la roue du Moulin. Une vanne usinière levante sert à prélever l'eau pour faire tourner une roue d'agrément. Ce canal usinier est séparé du Vicoin par l'intermédiaire d'un déversoir en béton et d'une ancienne chaussée en terre. La passe à poissons est accolée à ce déversoir.



Figure 3 - La passe à poisson au moulin du Bas Coudray (@CANU Pao ; GoogleMaps®)

Le principe de la passe à bassins successifs consiste à diviser la hauteur de chute à franchir en plusieurs chutes plus petites, formant une série de bassins (figure 4). La création de deux radiers à l'aval a permis de diminuer la hauteur de chute à compenser (de 1,82m à 1,40 mètres). Les caractéristiques hydrauliques sont déterminées par les dimensions des bassins, des cloisons et des fentes. Ces dimensions ont été calculées pour répondre aux capacités natatoires de 2 espèces cibles : La vandoise, l'anguille et la truite fario. Les caractéristiques de déplacements de la vandoise et de la truite ainsi que le maintien du DMR impliquent un dimensionnement spécifique de la passe. Une passe à brosse spécifique à été conçue pour le passage des anguillettes.

Au regard de ces éléments, le dispositif dispose des caractéristiques suivantes :

- 7 bassins successifs de 3.0 m de long par 2,0 m de large, et 75 cm de profondeur,
- 7 échancrures rectangulaires à double niveau présentant une échancrure basse (de 0,25m de large) et une échancrure haute (de 1,75m de large).

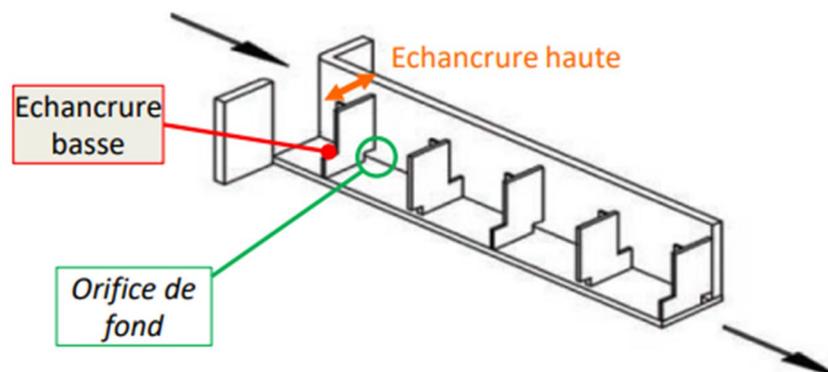


Figure 4 - Schéma explicatif du principe d'une passe à poisson à bassins successifs (Morin, 2017)

Le dispositif piscicole est défini comme fonctionnel par le bureau d'étude PCM ingénierie pour les espèces cibles à partir d'un débit du Vicoin de $0,09\text{m}^3/\text{s}$ jusqu'au double du module : $1,8\text{m}^3/\text{s}$ (soit environ 63% du temps selon la répartition des débits moyens classés estimés au droit de la zone d'étude). En dessous de cette borne la migration par la passe n'est pas assurée à cause de l'apparition d'un effet de chute au niveau du passage d'un bassin à l'autre. Au-dessus, le débit présent au niveau du clapet est plus attractif que la passe.

2.2.2 Matériel et outils

2.2.2.1 Le River Watcher

Le River Watcher® est un dispositif de suivi à distance développé par l'entreprise islandaise Vaki Aquaculture Systems LTD. Le scanner développé par cette entreprise a pour but de contrôler la croissance des saumons d'élevage en pleine mer. Son utilisation a été dérivée majoritairement pour suivre la migration des espèces amphihalines sur les rivières continentales. Le scanner a été complété par un dispositif constitué d'un caisson équipé d'une caméra. Les données issues du scanner et de la caméra sont bancarisées dans un ordinateur fixe dédié. Le scanner est un dispositif qui peut fonctionner sans la caméra.

Les dimensions sont de 56 cm de hauteur, 40 cm de largeur et de 26 cm de profondeur. Il est équipé de deux rangées de diodes émettant des rayons infrarouges qui permettent de lire la silhouette du poisson qui passe à l'intérieur (figure 5). Chaque rangée génère une silhouette différente, celles-ci peuvent être comparées par la suite.

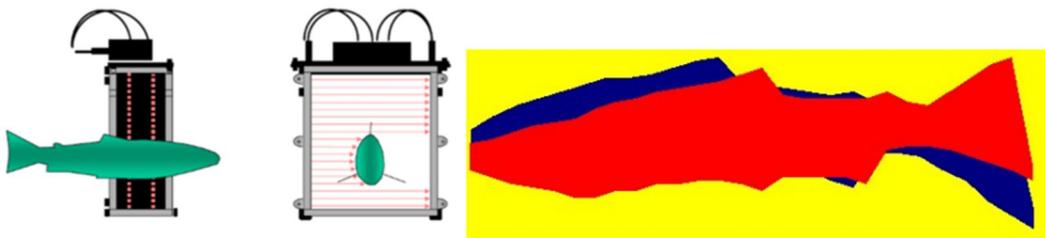


Figure 5 - Illustration du fonctionnement de la passe à poisson (@FishPass)

La succession de l'activation des rangées de diodes permettent d'identifier le sens de circulation du poisson (figure 6). La hauteur minimale détectée par le scanner est de 4 cm.

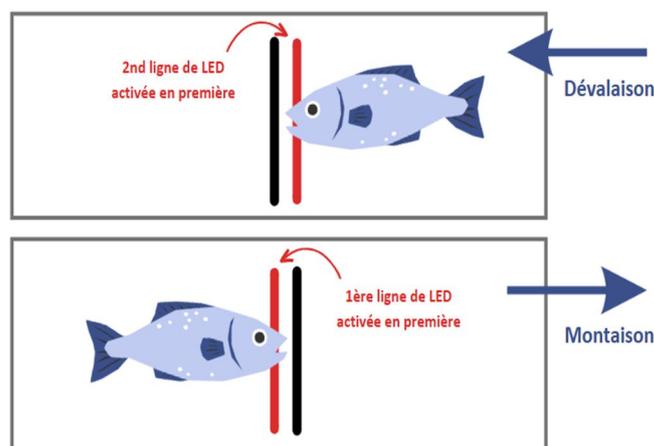


Figure 6 - Illustration du fonctionnement des diodes (@CANU Pao)

Le dispositif d'enregistrement des vidéos est situé en complément d'un caisson métallique. Il s'agit d'un compartiment en métal de 160 cm de longueur sur 105 cm de largeur pour 63 cm de hauteur intérieure (figures 8 et 9). La caméra est enfermée dans un dispositif étanche avec une vitre constituant un côté du caisson. L'autre côté est constitué d'un fond blanc pour créer un contraste avec le poisson qui y passe. Pour collecter les vidéos, il est possible de filmer avec une lumière infrarouge ou avec un éclairage classique. Le système d'enregistrement filme en continu mais ne garde que les événements faisant suite à un déclenchement du scanner. Le Riverwatcher® garde les 30 secondes précédents le passage (dans le cas d'une dévalaison) ou les 30 secondes faisant suite au passage (dans le cas d'une montaison). Un ordinateur fixe situé à proximité, bancarise en temps réel les données (figure 7).



Figure 9 - Mise en place du Riverwatcher à l'entrée de la passe à poisson au Genest-Saint-Isle (@Syndicat JAVO)



Figure 8 - L'ordinateur fixe, lié au Riverwatcher sur lequel il est possible d'extraire les données (@CANU Pao)



Figure 8 - Installation du Riverwatcher (@Syndicat JAVO)

Le Riverwatcher® calcule la hauteur du poisson ainsi que sa longueur d'après sa vitesse ainsi qu'un coefficient morphologique spécifique à l'espèce étudiée. Pour cette étude, c'est le coefficient du saumon qui a été utilisé étant la variable par défaut proposé par le logiciel. La combinaison silhouette/vidéo permet de déterminer les traits morphologiques de l'individu, lorsque c'est possible, et d'en déduire l'espèce.

2.2.2.2 Le logiciel Winari®

Le logiciel Winari® (figure 10) permet de visualiser les silhouettes, la direction, la temporalité (date et heure), les données morphologiques du poisson (longueur et hauteur) ainsi que la vidéo liée à cet évènement le cas échéant.

Il est possible d'extraire les données de Winari® dans un tableau Excel afin d'acquérir des données utilisables pour y effectuer des manipulations ou des calculs statistiques.



Figure 10 - L'interface du logiciel Winari® (@CANU Pao)

2.2.2.3 Les logiciels de statistiques : Excel et R

Pour les analyses de données, deux logiciels ont été utilisés :

- Excel et XLSTAT avec la version 2306
- R avec la version 2022.12.0

2.2.3 Méthodologie

Le but de l'étude est d'établir des liens de causalité entre le passage des poissons visibles à l'aide du Riverwatcher® et des variables environnementales déterminées lors d'une recherche bibliographique préalable. Pour optimiser les résultats, le syndicat a fait le choix de traiter l'ensemble des informations produites par le complexe scanner/caméra. Chaque silhouette est analysée et chaque vidéo est lue.

2.2.3.1 Visualisation des vidéos enregistrées par le logiciel

La première phase consiste à visualiser toutes les vidéos enregistrées par le logiciel Winari®. Si un poisson est visible sur la vidéo, l'évènement est enregistré. L'espèce est si possible identifiée à l'aide du livre de Keith et al. (2020) : Les poissons d'eau douce de France (Deuxième édition). Si l'identification n'est pas possible avec certitude, le diminutif « IND » (pour indéterminé) est noté à la place.

Le principe utilisé est celui « d'un poisson, un évènement, une ligne ». Par exemple une seule vidéo peut compiler 5 évènements différents car présentant 5 passages simultanés de poissons et générer 5 évènements scanner.

Cependant, le fait de ne pas visualiser de poissons sur la vidéo ne signifie pas qu'aucun poisson ne soit passé. En effet, en fonction de la turbidité de l'eau, il est parfois impossible de signaler la présence d'un poisson alors même que le logiciel a enregistré la vidéo. L'enregistrement peut être dû à une branche ou à un autre objet passant par les capteurs à infrarouges. De ce fait, il est obligatoire de visualiser les silhouettes retenues par le logiciel (cf. partie 2.2.3.2). Ainsi, à la fin de la visualisation des vidéos, un nombre restreint de poissons aura été comptabilisé.

2.2.3.2 Visualisation des silhouettes enregistrées par le logiciel

Après avoir visualisé les vidéos, il est nécessaire de se focaliser sur l'aspect des silhouettes afin de savoir si un poisson est passé sans être visible sur la vidéo. Parfois, une silhouette de poisson apparaît alors même qu'aucun poisson n'a été visualisé sur la vidéo. Dans ce cas, l'évènement est enregistré. Si la silhouette ne correspond pas et qu'aucun individu n'a été détecté sur la vidéo, l'évènement est supprimé. Les caractéristiques du passage présenté par le logiciel peuvent également aider à savoir si l'évènement semble réaliste ou non. En effet, des vitesses ou des tailles anormales tendent à envisager un évènement non plausible et ne correspondant pas à un poisson. Pour évacuer tout risque d'aberration dans le diagnostic, on se rattache à l'analyse résumée dans l'arbre décisionnel ci-dessous (figure 11).

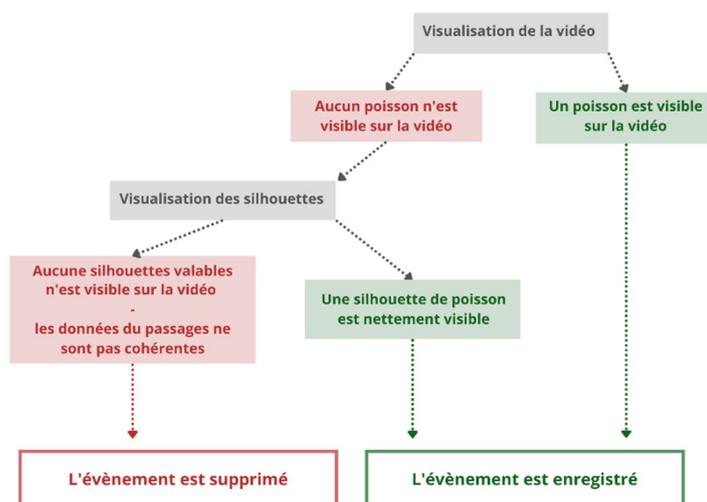


Figure 11 - Arbre décisionnel pour l'analyse (@CANU Pao)

2.2.3.3 Export des données biométrique

Les données sont ensuite exportées du logiciel Winari® vers un tableau Excel. Les données conservées sont :

- la date,
- l'heure,
- la longueur du poisson,
- la hauteur du poisson,
- la direction,
- la vitesse

Deux colonnes sont ajoutées à ce jeu de données : une colonne espèce et une colonne numéro de vidéo (figure 12). La première vient de l'analyse préalable des vidéos. Lorsque l'espèce est identifiée, celle-ci est renseignée. Dans le cas contraire, le code espèce IND pour « Indéterminé » est inscrit à la place. L'ajout du numéro de la vidéo correspondant à l'évènement permet d'aller revérifier la vidéo plus tard si nécessaire.

DONNÉES CAMÉRA											
ID				Espèce			Caractéristiques morphologiques				
ID	Date	Heure	Code Vidéo	Code espèce	Espèce (nom latin)	Espèce (nom vernaculaire)	Hauteur du corps mesuré (mm)	Longueur du corps calculée (cm)	Vitesse de déplacement (m/s)	Direction	Remarque(s)
2019_1	01/11/2019	2:32	1	CHÉ	Squalius cephalus	Chevaine	97	58	0,73	Dévalaison	
2019_2	01/11/2019	2:42	2	BR	Abramis/Blicca	Brème sp	97	58	0,67	Dévalaison	
2019_3	01/11/2019	5:30	3	IND	Indéterminé	Indéterminé	65	39	1,04	Dévalaison	
2019_4	02/11/2019	0:16	4	IND	Indéterminé	Indéterminé	77	46	0,76	Montaison	

Figure 12 - Tableau Excel sur lequel les données de l'évènement sont inscrits

2.2.3.4 Bancarisation des données environnementales

Une étude bibliographique est nécessaire afin de déterminer des variables environnementales pertinentes dans l'études des mouvements holobiotiques des poissons d'eau douce. Après avoir listé un certain nombre de paramètres susceptibles d'impacter les migrations piscicoles, une sélection se base sur la régularité d'apparition des variables dans la littérature ainsi que la facilité d'extraction et de disponibilité des données. Par exemple, les variables chimiques (taux de nitrates, phosphore, ammonium) dont l'importance a déjà été démontrée chez les poissons (Philippart, 1990 ; Matthaei & Lange, 2015 ; Frimpong & Angermeier, 2010) ne seront pas étudiées car elles sont indisponibles sur le site du Bas Coudray. Ainsi, il a été décidé d'étudier les variables suivantes :

- Température de l'eau,
- Pression atmosphérique,
- Cycle lunaire,
- Photopériode (durée d'ensoleillement),
- Débit,
- Pluviométrie.

Certaines variables secondaires ont été extrapolées à partir de celles-ci (tableau 2)

Tableau 2 - Le choix des variables environnementales principales et secondaires

Variables principales	Variables secondaires
Température de l'eau (en °C)	<ul style="list-style-type: none"> Moyenne journalière Moyenne des dix derniers jours (décade) Delta des températures (Température moyenne du jour même – Température moyenne du jour précédent → $\Delta T = T_N - T_{(N-1)}$)
Pression atmosphérique (en hPa)	<ul style="list-style-type: none"> Moyenne journalière Moyenne des dix derniers jours (décade) Delta des pressions atmosphériques (Pression atmosphériques du jour même – Pression atmosphériques du jour précédent → $\Delta Pa = Pa_N - Pa_{(N-1)}$)
Cycle lunaire	<ul style="list-style-type: none"> Cycle du jour même Jours proche (+/- 3 jours) de la pleine lune et de la nouvelle lune
Photopériode (en mm)	<ul style="list-style-type: none"> Durée du jour considéré
Débit (en m ³ /s)	<ul style="list-style-type: none"> Débit moyenne de la journée Débit moyen des dix derniers jours (décade) Delta des débits moyens (Débit moyen du jours même – Débit moyen du jour précédent → $\Delta Q = Q_N - Q_{(N-1)}$)
Pluviométrie (en mm)	<ul style="list-style-type: none"> Pluviométrie du jour même Pluviométrie du jour précédent Somme de la pluviométrie des dix derniers jours (décade)

Le tableau ci-dessous (tableau 3) indique les sites sur lesquels les données ont été récupérées.

Tableau 3 - Site internet utilisés dans le cadre de ce stage

Variables environnementales	Site internet sur lesquels les données ont été téléchargées
Température de l'air	<ul style="list-style-type: none"> Météo France à Laval (PREVISIONS METEO FRANCE - Site Officiel de Météo-France - Prévisions gratuites à 15 jours sur la France et sur le monde) Historique-météo.net à Laval (Météo du 01 janvier 2019 à Laval (Mayenne) : Quel temps faisait-il le 01/01/2019 ? (historique-meteo.net)) Info.Climat, station météorologique de Laval-Etronier (Climatologie de l'année 2023 à Laval-Etronier - Infoclimat). Météociel.fr à Laval (MétéoCiel- Climatologie mensuelle de Laval (53)) Météo.Bretagne, station de Laval-Etronier (Données climatiques mensuelles à la station LAVAL-ETRONNIER - Météo Bretagne (meteo.bzh))
Température de l'eau*	<ul style="list-style-type: none"> Données du syndicat JAVO acquises à l'aide de sondes sur certaines localisations du Vicoin. Données acquises via les données de températures de l'air.
Pression atmosphérique	<ul style="list-style-type: none"> Météo.Bretagne, station de Laval-Etronier (Données climatiques mensuelles à la station LAVAL-ETRONNIER - Météo Bretagne (meteo.bzh))

Débit	<ul style="list-style-type: none"> Données personnelles du Syndicat Hydroportail sur le site EauFrance (SCHAPI - HydroPortail (eaufrance.fr))
Cycle Lunaire	<ul style="list-style-type: none"> Kalendrier (Calendrier lunaire avec tous les cycles de la lune - Kalendrier (ouest-france.fr)) Calendrier.xyz (Calendrier 2023 et vacances scolaires 2022 - 2023)
Pluviométrie	<ul style="list-style-type: none"> Météo.Bretagne, station de Laval-Etronier (Données climatiques mensuelles à la station LAVAL-ETRONNIER - Météo Bretagne (meteo.bzh))
Photopériode	<ul style="list-style-type: none"> Météo.Bretagne, station de Laval-Etronier (Données climatiques mensuelles à la station LAVAL-ETRONNIER - Météo Bretagne (meteo.bzh)) Météo France à Laval (PREVISIONS METEO FRANCE - Site Officiel de Météo-France - Prévisions gratuites à 15 jours sur la France et sur le monde)

Une base de données a été créée résumant les variables abiotiques pour chaque journée du 1^{er} novembre 2019 au 31 mai 2023. Une colonne abondance permet de savoir combien de poissons (identifiés ou non) ont été enregistrés par le Riverwatcher sur chaque journée.

2.2.3.5 Mise en forme de la base de données

Le manque de données sur la thermie de l'eau au niveau du site du Bas Coudray a conduit à la réalisation d'un comparatif entre les températures de l'air (moyenne sur la décade) et les températures de l'eau (moyenne sur la décade). Les données de température (air et eau) proviennent d'un site d'étude sur la rivière Jouanne où des thermo boutons ont enregistré les variations thermiques sur une année complète. L'analyse a permis de définir un coefficient de proportionnalité entre les deux valeurs. Le fait de s'intéresser aux moyennes des décades et non aux moyennes journalières a permis de limiter les fortes amplitudes journalières observables sur les températures de l'air et non sur les températures de l'eau, du fait d'une inertie thermique plus importante dans l'eau. Le graphique suivant (figure 13) présente une comparaison des températures de l'eau sur une décade calculée à l'aide de cette méthode ainsi que les températures de l'eau décade enregistrées sur une année où les sondes étaient fonctionnelles : l'année 2020.

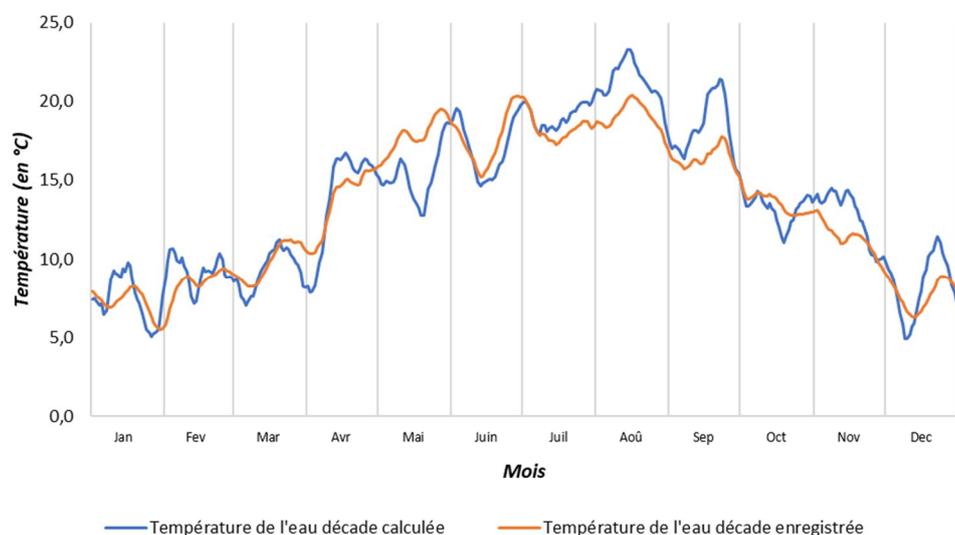


Figure 13 - Comparaison des températures de l'eau calculées et mesurées

On remarque ainsi une très forte corrélation entre les deux variables ($R^2=0,994$, $p\text{-value} < 0.001$) (figure 14).

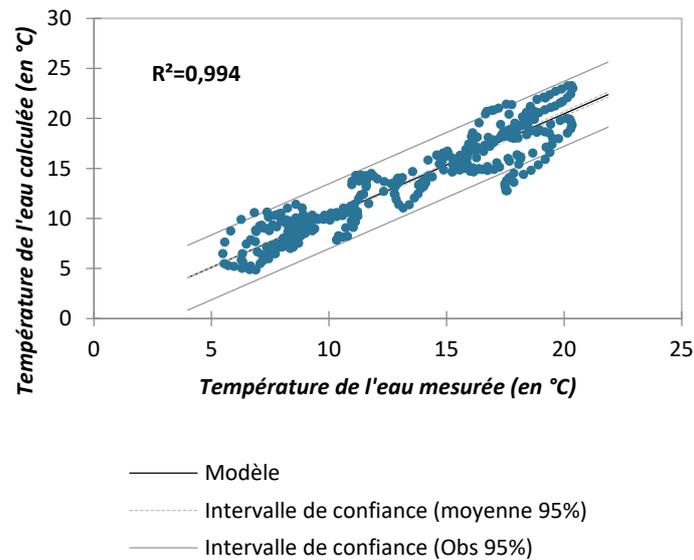


Figure 14 - Régression linéaire de la température calculée par la température mesurée

Afin de permettre une étude statistique cohérente, certaines modifications ont été entreprises sur la banque de données initiale. En effet, parmi les 1308 jours enregistrés, 1073 journées ne présentent aucun passage de poissons. Des éléments d'explications seront développés plus loin dans ce dossier. De ce fait, ces données nulles peuvent fausser les résultats statistiques. Ainsi, deux filtres sont opérés afin de limiter ces biais. Tout d'abord et d'après le bureau d'étude à l'origine des plans de conception de la passe à poisson (Morin, 2017), le passage n'est pas possible lorsque le débit est inférieur à $0,09\text{m}^3/\text{s}$. Ce qui a été confirmé par les observations par le vidéo-compteur. En conséquence, les journées présentant un débit inférieur à cette valeur seuil sont supprimées de l'étude. Un second filtre concernant l'enregistrement des événements par le Riverwatcher est opéré : Il est décidé qu'à partir de deux jours consécutifs sans aucun enregistrement de toute nature (poisson, feuille, bout de bois...), les journées considérées sont supprimées. En effet, l'absence d'enregistrement sur cette durée peut traduire un problème technique (panne d'électricité, problème de fonctionnement...) ou une turbidité trop élevée empêchant les rayons de traverser l'eau. Une fois cette sélection faite, le nombre de jours étudiés est défini (tableau 4).

Tableau 4 - Différences entre les jours enregistrés et étudiés après suppression des débits limitants et des incertitudes du Riverwatcher

Années	2019	2020	2021	2022	2023	Somme
Nombre de jours enregistrés	61	365	365	365	151	1307
Jours supprimés	24	183	193	247	43	690
Nombre de jours étudiés	37	182	172	118	108	617
Abondance	35	193	131	237	358	954
Nombre de passages moyen par jours étudiés	0,95	1,06	0,76	2,01	3,31	

2.2.4 Analyse statistique préalable

Le test de Shapiro-Wilk est effectué sur chaque variable afin de tester leur normalité ($p \leq 0,029$). Le test de Spearman est utilisé afin de constater la significativité des données quantitatives non-paramétriques entre elles (débit, température, pluviométrie, pression atmosphérique, photopériode) et le test de χ^2 afin de tester la significativité des données qualitatives (Cycles lunaires). Le test de Kruskal-Wallis a quant à lui permis de tester la significativité des différences des médianes des périodes de passages phénologiques. Un GLM (ou « Generalized Linear Model ») ainsi que la fonction AIC (ou « modèle de critère d'information d'Akaike ») a également été produit (tableau 5). Celui-ci utilise une fonction de lien logarithmique pour relier la moyenne de la distribution à des variables explicatives. Le modèle estime les coefficients qui représentent l'effet de chaque variable sur l'abondance. Son principe est d'obtenir une estimation de l'abondance ou de la fréquence des événements de dénombrement en fonction des variables explicatives.

Tableau 5 - Résultats des tests de Shapiro-Wilk afin de tester la normalité des variables

Variabes environnementales secondaires	W	p-value
<i>Abondance</i>	0,313	<0,0001
<i>Débit moyen</i>	0,680	<0,0001
<i>Delta débit moyen</i>	0,580	<0,0001
<i>Débit décade</i>	0,732	<0,0001
<i>Photopériode</i>	0,903	<0,0001
<i>Pluviométrie décade</i>	0,882	<0,0001
<i>Pluviométrie du jour précédent</i>	0,562	<0,0001
<i>Pluviométrie du jour même</i>	0,542	<0,0001
<i>Moyenne pression atmosphérique journée</i>	0,988	<0,0001
<i>Delta pression atmosphérique</i>	0,995	0,029
<i>Pression moyenne</i>	0,991	0,001
<i>Température de l'eau, moyenne de la décade</i>	0,989	<0,0001
<i>Delta de la température de l'eau</i>	0,977	<0,0001

2.3 Résultats

Sur la période d'étude, 11 476 évènements ont été enregistrés. Parmi ceux-ci, 954 individus ont été comptabilisés, représentant donc environ 8% du total des évènements toutes années confondues. 12 espèces ont été identifiées avec certitude mais plus de 58% des individus sont restés indéterminés (tableau 6). Sur les 964 jours de fonctionnement du dispositif de 2019 à 2023, 729 jours n'ont donné lieu à aucune observation de poissons (soit 75,6 %). Les déplacements se sont concentrés sur 240 jours avec 1 seul poisson observé (N=110 jours, 45,8%), puis 2 poissons par jour (N=32), 3 poissons (N=28), 4 poissons (N=13), de 5 à 9 poissons (N=39), de 10 à 19 poissons (N=11) et plus de 20 poissons (N=7). Les déplacements les plus importants ont été de 34, 59 et, le maximum, 75 individus sur une journée. Ces 3 jours cumulés représentent 17,6% du total des poissons dont 11,4% pour deux jours à suivre (34 et 75 individus) sur le mois d'avril 2023.

Tableau 6 - Abondance pour chaque espèce en fonction de l'année

ESPECE (CODE)	ESPECE (NOM VERNACULAIRE)	ESPECE (NOM LATIN)	2019	2020	2021	2022	2023	SOMME
IND	Indéterminé	<i>Indéterminé</i>	33	82	74	184	187	560
BR	Brème indéterminé	<i>Abramis/Blicca</i>	1	47	30	27	143	248
BRO	Brochet	<i>Esox lucius</i>	0	11	13	13	13	50
PER	Perche	<i>Perca fluviatilis</i>	0	27	2	11	2	42
CHE	Chevesne	<i>Squalius cephalus</i>	1	9	7	0	3	20
BBG	Black Bass	<i>Micropterus salmoides</i>	0	4	0	0	4	8
TAC	Truite arc-en-ciel	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	0	3	3	1	1	8
BAF	Barbeau fluviatile	<i>Barbus barbus</i>	0	6	0	0	1	7
CCO	Carpe	<i>Cyprinus carpio</i>	0	0	1	1	3	5
GAR	Gardon	<i>Rutilus rutilus</i>	0	3	0	0	0	3
TAN	Tanche	<i>Tinca tinca</i>	0	0	1	0	0	1
HOT	Hotu	<i>Chondrostoma nasus</i>	0	1	0	0	0	1
VAN	Vandoise	<i>Leuciscus burdigalensis</i>	0	0	0	0	1	1
SOMME			35	193	131	237	358	954

D'après les passages des poissons, il est possible de déterminer les pics de mouvement afin de les comparer et de mettre en évidence des forts moments de passage (figure 15).

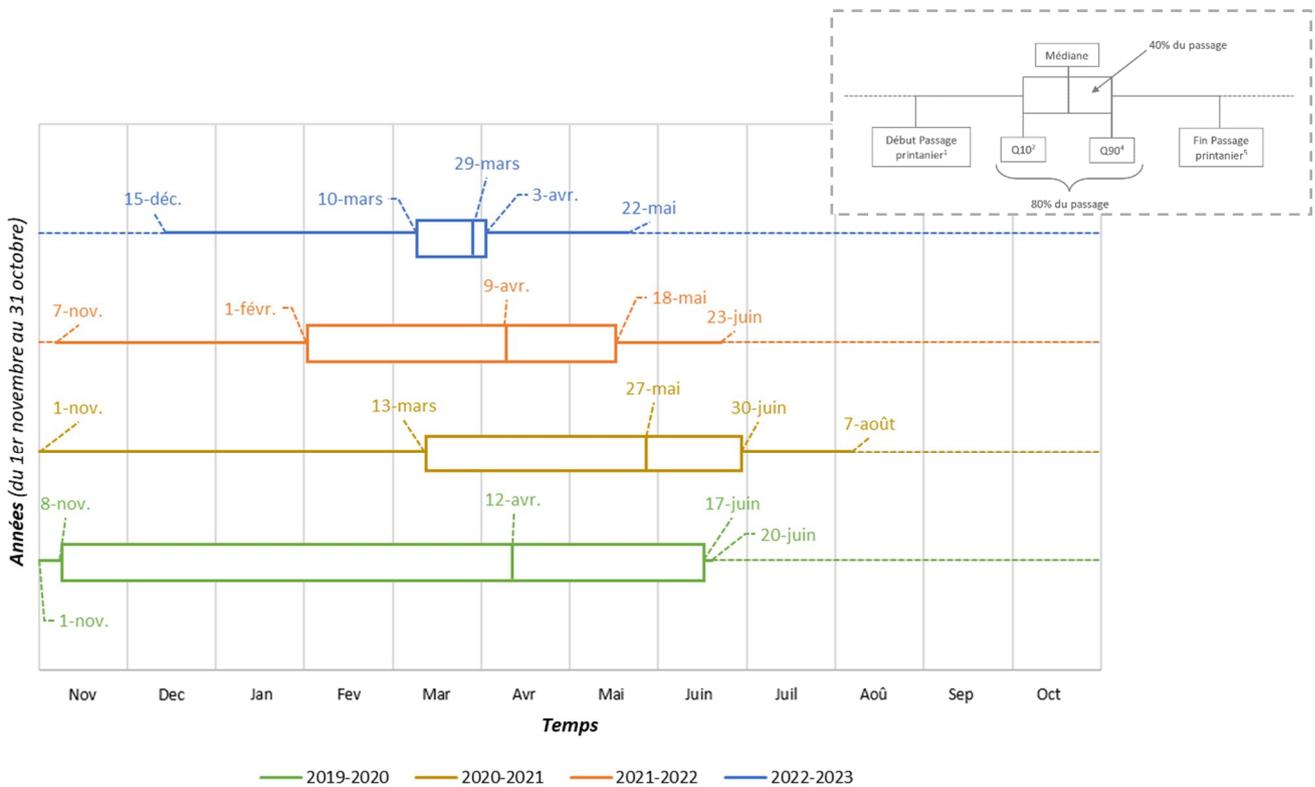


Figure 15 - Phénologie des déplacements de poissons (sans distinction d'espèces)

Pour une question de lisibilité, une année sur la figure ci-dessus commence le 1er novembre et se termine le 31 octobre. Une ligne ne correspondant donc pas essentiellement à une année.

De fortes variations interannuelles sont observables dans les déplacements des poissons mettant en évidence une concentration des passages entre mi-janvier et juin. En moyenne, 80% des passages s'étendent sur 115,5 jours avec de fortes variations interannuelles (*différence significative d'après le test de Kruskal-Wallis, $K = 13,72$; $p\text{-value} = 0,003$*). La médiane cependant semble moins varier d'une année sur l'autre.

Les espèces dont le nombre d'individus identifiés est supérieur à $N=40$ ont été étudiées spécifiquement. Sur les trois années complètes et les deux années partielles, seules trois espèces montrent un effectif supérieur à 40 individus : le complexe brème (brème bordelière (*Blicca bjoerkna*) et brème commune (*Abramis brama*) confondues) (figure 16), le brochet (*Esox lucius*) (figure 17) et la perche commune (*Perca fluviatilis*) (figure 18). Sur la figure, un point apparaît lorsqu'au moins 1 individu a été enregistré comme traversant la passe. Les abondances indiquées avec un trait en pointillés représentent les sommes d'abondances interannuelles.

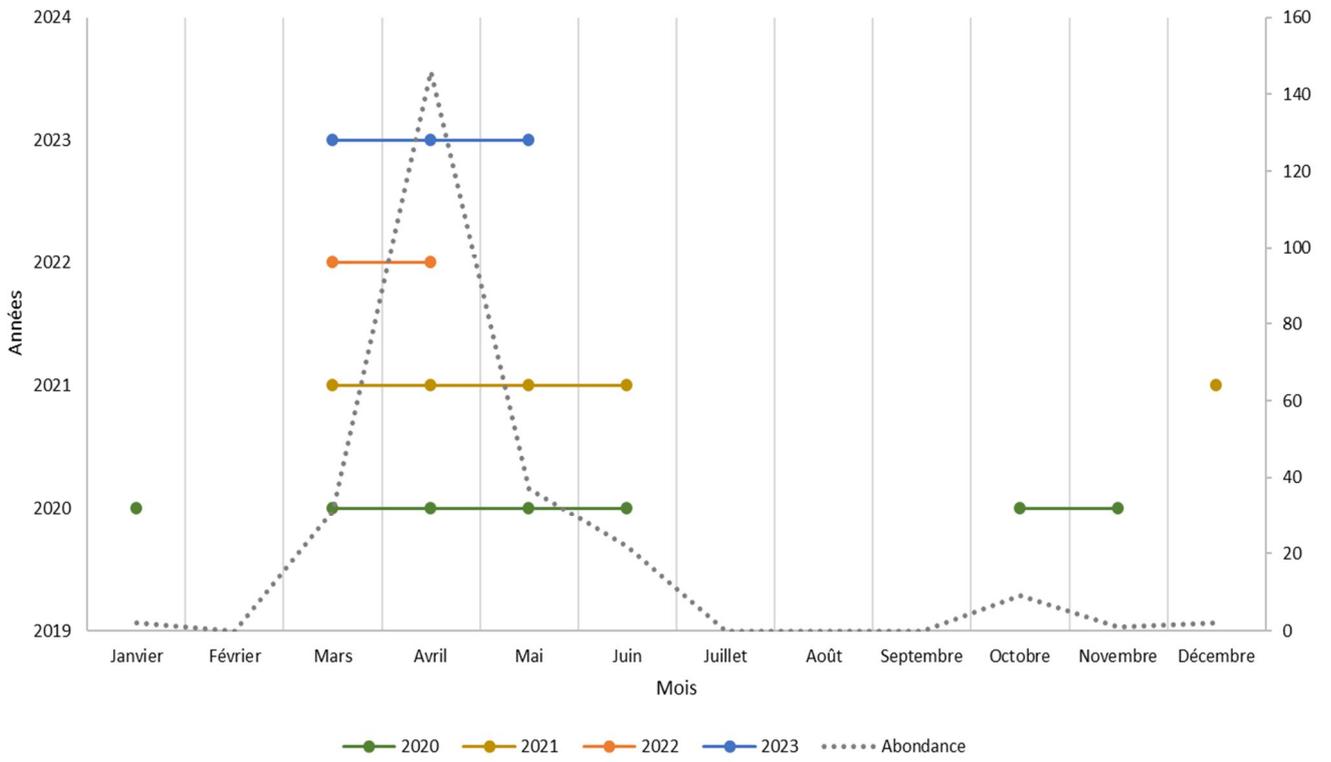


Figure 17 - Phénologie des déplacements de la Brème (N=248)

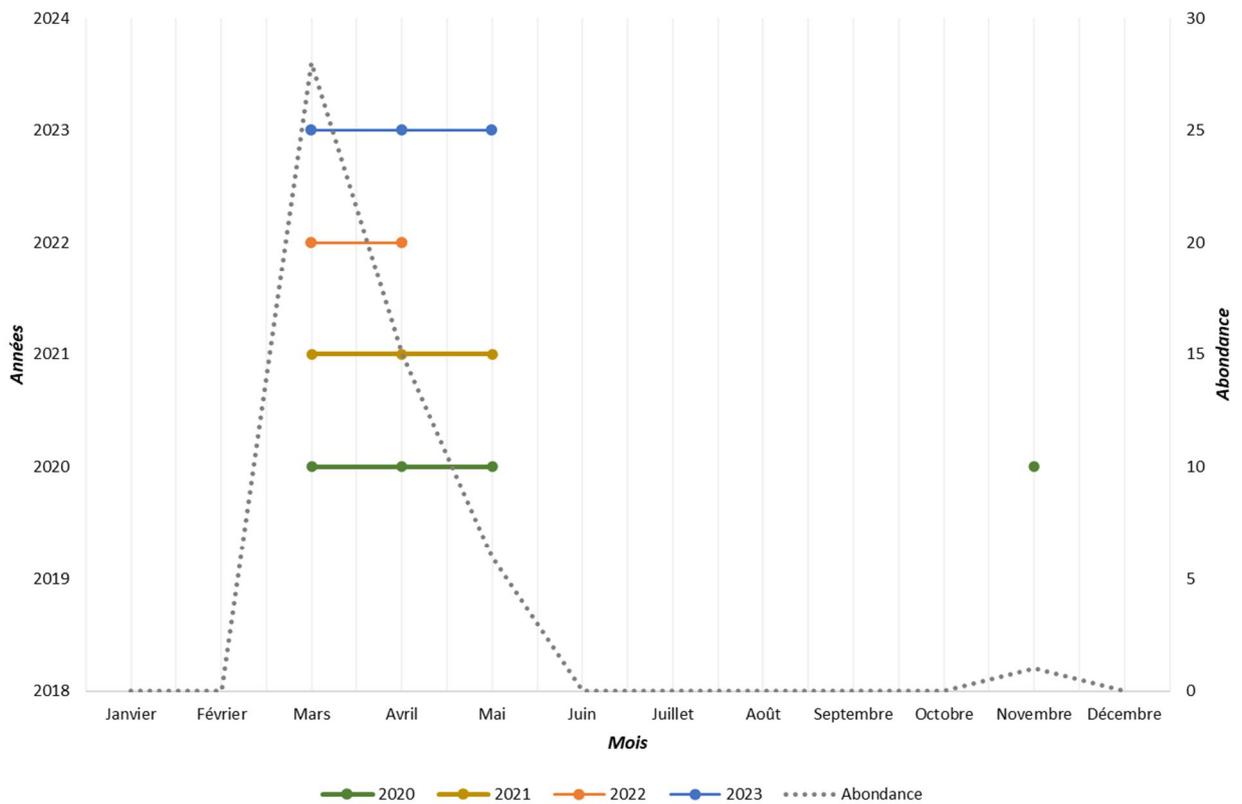


Figure 16 - Phénologie des déplacements du Brochet (N=50)

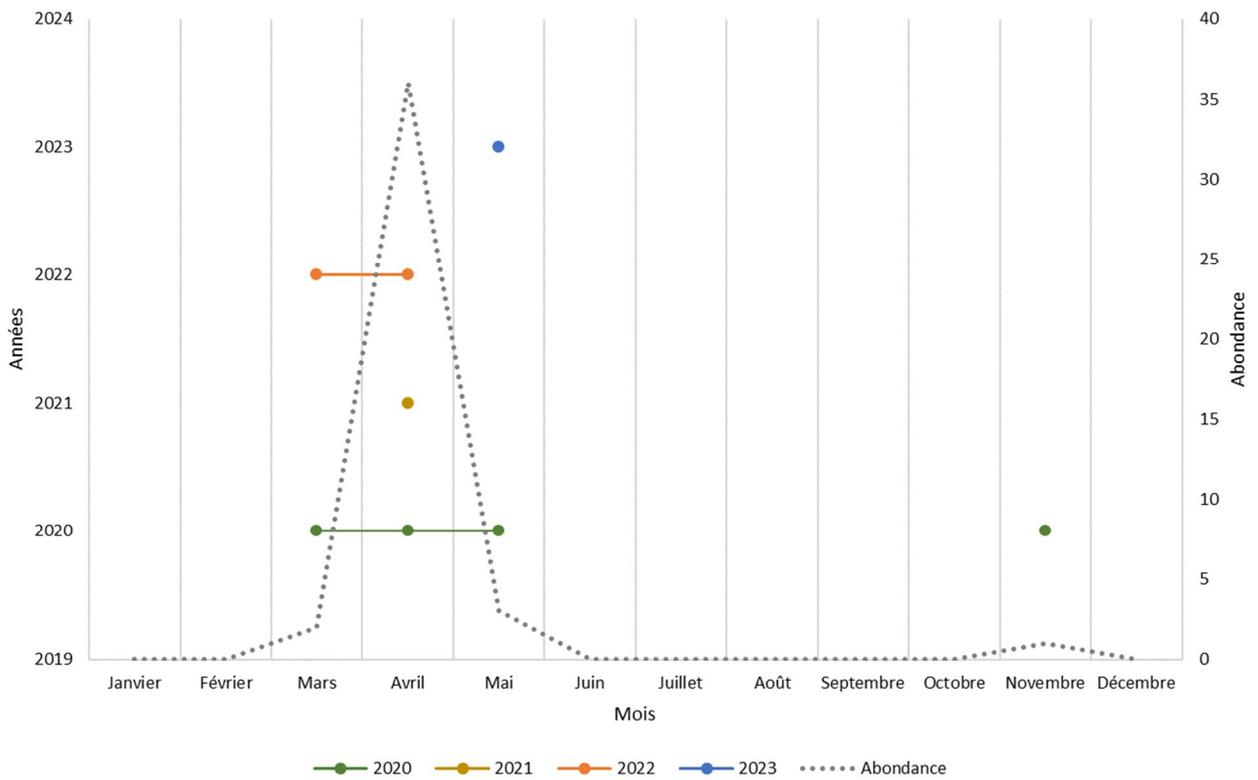


Figure 18 - Phénologie des déplacements de la perche (N=42)

La phénologie de chaque espèce étudiée démontre une même tendance avec des passages importants de mars à juin (figures 16, 17 et 18) et des passages moins abondants en octobre et novembre. La brème présente tout de même un passage plus étendu que pour le brochet et la perche mais cela peut être dû au nombre plus important d'individus détectés (N=248).

Les déplacements sont observés à toutes les heures de la journée sans aucune tranche horaire préférentielle même si les effectifs cumulés par heure sont en moyenne, un peu plus élevés entre 17 h 00 et 23 h 00.

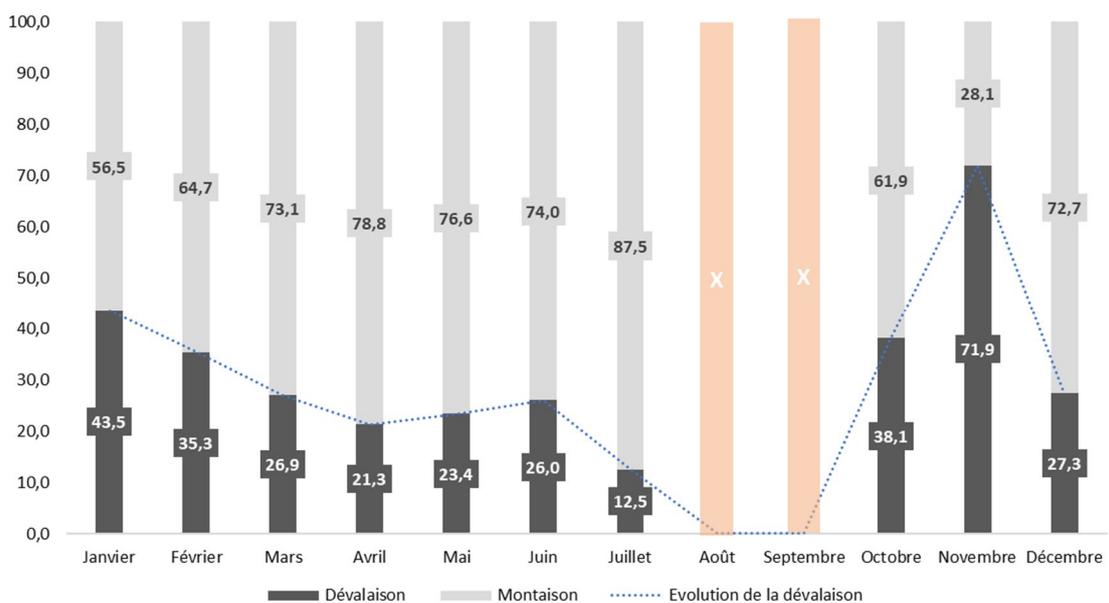


Figure 19 - Proportion de dévalaison et de montaison des passages de poissons dans la passe

La figure 19 présente les proportions de montaison et de dévalaison toutes espèces confondues. Une légère baisse de la proportion de la dévalaison de janvier à juillet est observée puis une forte hausse en octobre et novembre. La fin juin présente souvent une baisse des débits conduisant un ralentissement des déplacements des espèces jusqu'à l'atteinte des débits limitants pour le passage de la passe, d'où le manque de données en août et septembre.

Les tests de Spearman mettent en évidence une corrélation entre l'abondance et les 7 variables environnementales sélectionnées (tableau 7). Le débit moyen, la température de l'eau de la décade et la pluviométrie de la décade (les trois variables les plus significativement corrélées à l'exception de la photopériode, identique d'une année sur l'autre) ont été représentées simultanément sur les figures 22, 23 et 24).

Tableau 7 - Résultats des tests de Spearman (les variables grisées sont considérées comme significatives)

Variables environnementales secondaires	Diminutif	Spearman	p-value
<i>Photopériode</i>	<i>Pho</i>	0,287	<0,0001
<i>Température de l'eau, moyenne de la décade</i>	<i>T_{eau10}</i>	0,182	<0,0001
<i>Débit moyen</i>	<i>Q_m</i>	0,180	<0,0001
<i>Pluviométrie décade</i>	<i>P₁₀</i>	0,148	<0,0001
<i>Débit décade</i>	<i>Q₁₀</i>	0,122	0,002
<i>Delta de la température de l'eau</i>	<i>ΔT_{eau10}</i>	0,094	0,019
<i>Pluviométrie du jour précédent</i>	<i>P_{J-1}</i>	0,082	0,043
<i>Delta pression atmosphérique</i>	<i>ΔPa</i>	0,070	0,081
<i>Pluviométrie du jour même</i>	<i>P_J</i>	0,009	0,826
<i>Moyenne pression atmosphérique journée</i>	<i>Pa</i>	-0,034	0,399
<i>Pression moyenne décade</i>	<i>Pa_{m10}</i>	-0,053	0,191
<i>Delta débit moyen</i>	<i>ΔQ_m</i>	-0,068	0,092

Le GLM réalisé (tableau 8) met en avant des résultats quelque peu différents mais présentant toujours le débit, la photopériode la pluviométrie et la température comme variables importantes. A noter l'apparition ici de la pression atmosphérique comme significativement liée à l'abondance contrairement au test de Spearman.

Tableau 8 - Résultats du test GLM

	Estimate	Std.error	Z value	Pr(> z)	Codes de signification
Q_m	3,563 ^e -01	4,100e-02	8,689	<2 ^e -16	***
Pho	8,448 ^e -03	4,205 ^e -04	20,093	<2 ^e -16	***
ΔPa	7,398 ^e -02	6,752 ^e -03	10,958	<2 ^e -16	***
T_{eau10}	-1,199 ^e -01	1,109 ^e -02	-10,814	<2 ^e -16	***
P_{J-1}	4,363 ^e -02	5,531 ^e -03	7,887	3,09 ^e -15	***
ΔQ_m	-1,591 ^e -01	4,175 ^e -02	-3,812	0,000138	***
Pa	-2,150 ^e -02	5,800 ^e -03	-3,706	0,000210	***
Pa_{m10}	3,307 ^e -02	9,237 ^e -03	3,580	0,000344	***
P₁₀	5,676 ^e -03	2,453 ^e -03	2,314	0,020692	*
P_J	-2,246 ^e -02	1,027 ^e -02	-2,186	0,028780	*
(Intercept)	-1,695 ^e +01	7,886 ^e +00	-2,150	0,031585	*
ΔT_{eau10}	7,750 ^e -02	5,517 ^e -02	1,405	0,160103	
Q₁₀	-4,842 ^e -02	5,179 ^e -02	-0,935	0,349815	

Afin d'étudier le pourcentage d'influence des variables abiotiques sur l'abondance, le modèle de critère d'information d'Akaike (AIC) a été réalisé (tableau 9). L'AIC compare différents modèles en évaluant à quel point ils ajustent les données tout en pénalisant la complexité du modèle. Un AIC plus bas indique un meilleur ajustement du modèle aux données. La fonction « *step* » sur le logiciel R, permet une sélection de modèle récursive en supprimant les termes un à un, en choisissant le modèle avec l'AIC le plus bas à chaque étape. Deux variables ont ainsi été retirées de l'étude afin d'améliorer le modèle : le débit en décade et le delta de la température de l'eau d'un jour sur l'autre. Après cette correction, le modèle présente un score AIC de 2789,4 contre 2790.51 avant correction.

Tableau 9 - Résultats du modèle de critère d'information d'Akaike (AIC)

Variable	Coefficient	Contribution à la déviance (en %)	Relation
Q _m	0.331059	Environ 39%	+
ΔQ _m	-0.143370	Environ 13%	-
T _{eau10}	-0.119262	Environ 11%	-
ΔT _{eau10}	0.081038	Environ 9%	+
ΔPa	0.075655	Environ 8%	+
P _{J-1}	0.044182	Environ 5%	+
Pa _m	0.034590	Environ 4%	+
Pho	0.008509	Environ 1%	+
P ₁₀	0.005546	Environ 1%	+
Pa	-0.023028	Environ 2%	-
P _J	-0.022045	Environ 2%	-
(Intercept)	-17.022297	N/A	N/A

Des coefficients sont également fournis par le logiciel, ceux-ci permettent de quantifier et d'interpréter l'effet des variables explicatives sur la variable réponse, en fournissant des estimations des changements associés à chaque variable explicative lorsque les autres variables sont maintenues constantes. Par exemple, pour le débit moyen : Le coefficient est de 0,331059 et indique que, toutes les autres variables étant maintenues constantes, une augmentation d'une unité de débit moyen est associée à une augmentation de $e^{0,331059}$ soit environ 39% de l'abondance attendue. Cela suggère que des valeurs plus élevées du débit moyen sont associées à une augmentation de l'abondance. Les deux variables secondaires concernant le débit et la température de l'eau en décade présente un pourcentage d'augmentation important (>10%) et ont donc un fort impact sur l'abondance. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus des tests de Spearman sauf pour quelques exceptions comme la photopériode qui semble ici avoir une importance bien plus faible ou la pression atmosphérique qui gagne en importance.

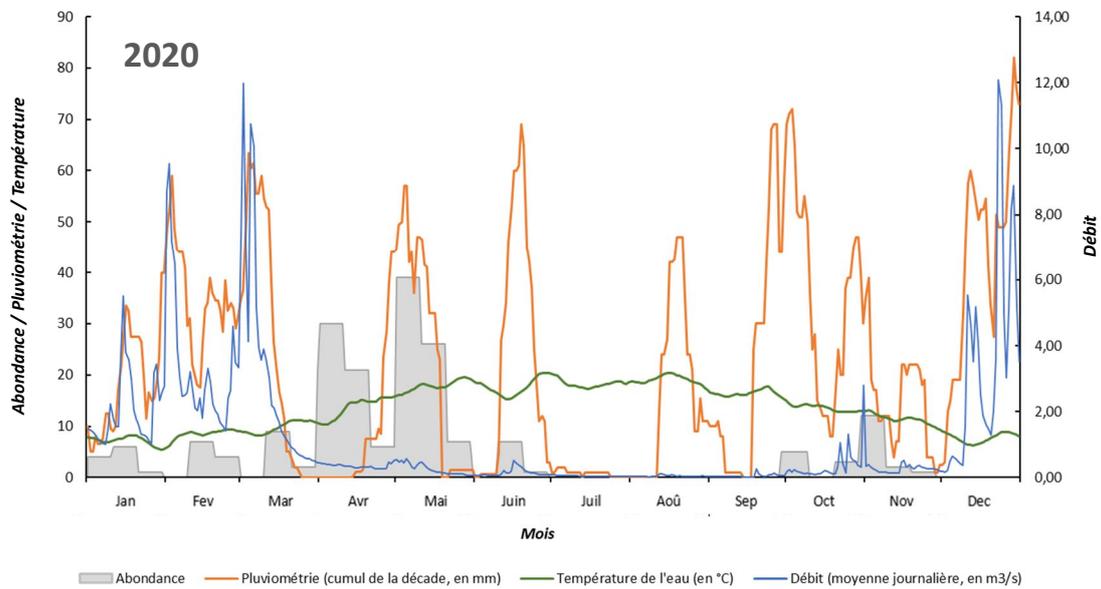


Figure 22 - Mise en relation pour l'année 2020 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit

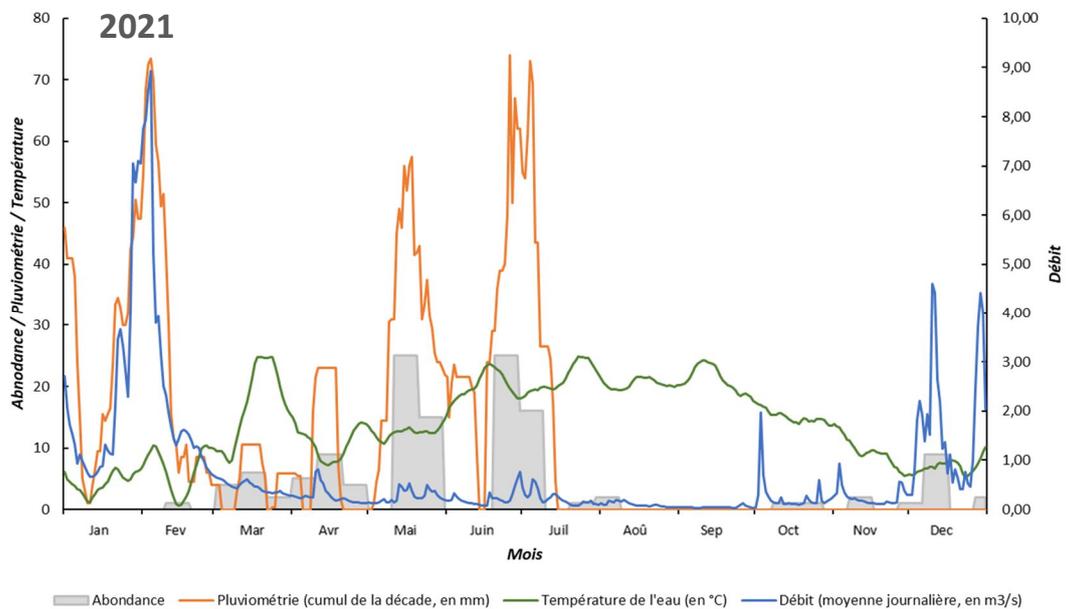


Figure 21 - Mise en relation pour l'année 2021 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit

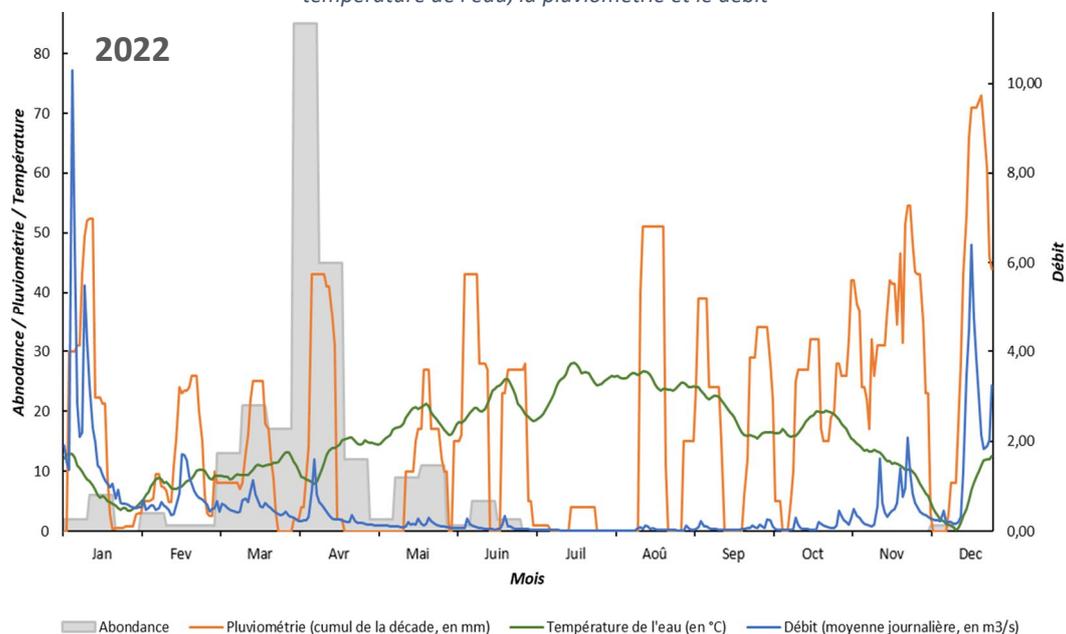


Figure 23 - Mise en relation pour l'année 2022 de l'abondance et de trois variables environnementales : la température de l'eau, la pluviométrie et le débit

Une corrélation entre la pluviométrie, le débit et l'abondance est démontré sur les figures, les pics de débit et de pluviométrie engendrant des pics d'abondance. Par exemple en avril 2020, Juin et juillet 2021 ou encore avril et juin 2022. Certains pics de pluviométrie comme ceux de septembre 2020 n'engendrent pas de pics d'abondances, cela est dû au fait qu'il s'agit d'une période où l'eau est très basse et où le nombre de passages est donc très limité.

Les pics d'abondance sont nettement associés aux fluctuations de débit et de pluviométrie (tableau 7 et 8). La figure montre que la pluviométrie contribue, avec un léger temps de latence, à une élévation des débits par une fraction restituée au cours d'eau, stimulant par la même le déplacement des poissons. Cependant, la réponse du débit dépend de la période de l'année : les pluies de la première moitié de l'année génèrent une très forte réponse du débit contrairement à la période estivale. Par exemple, deux pics de pluviométrie relativement similaires en termes d'intensité (janvier 2020 et fin août 2020, figure 22) ne présentent pas la même réaction du débit : Un fort pic du débit en janvier, et une hausse imperceptible des débits en août. Cela s'explique par une absorption de la pluviométrie par le sol et la végétation. La fraction restituée au cours d'eau est limitée et les débits ne réagissent pas.

La température de l'eau suit assez logiquement une augmentation jusqu'en été et une baisse progressive de l'automne vers l'hiver. Certains pics sont tout de même à mettre en avant comme le pic entre mars et avril 2021. Cependant, étant donné que la température de l'eau a été acquise à partir de la température de l'air, les valeurs extrêmes sont à analyser avec précaution car cela ne prend pas en compte l'inertie de l'eau. Des hausses de températures semblent parfois engendrer une hausse de l'abondance des passages, par exemple en juillet 2021 (23°C) et en juin 2022 (21°C) (figure 21 et 23). Des températures faibles (5-7°C) semblent contraindre les passages de l'ichtyofaune en début d'année où, alors qu'un fort débit aurait tendance à encourager les déplacements piscicoles, peu de déplacements sont enregistrés.

La photopériode ressort comme la variable la plus significativement corrélée à l'abondance (*Test de Spearman* : $S = 0,287$; $p\text{-value} = <0,0001$). La pression atmosphérique quant à elle ne ressort pas comme significative (*Test de Spearman* : $S = -0,034$; $p\text{-value} = 0,399$) dans cette étude.

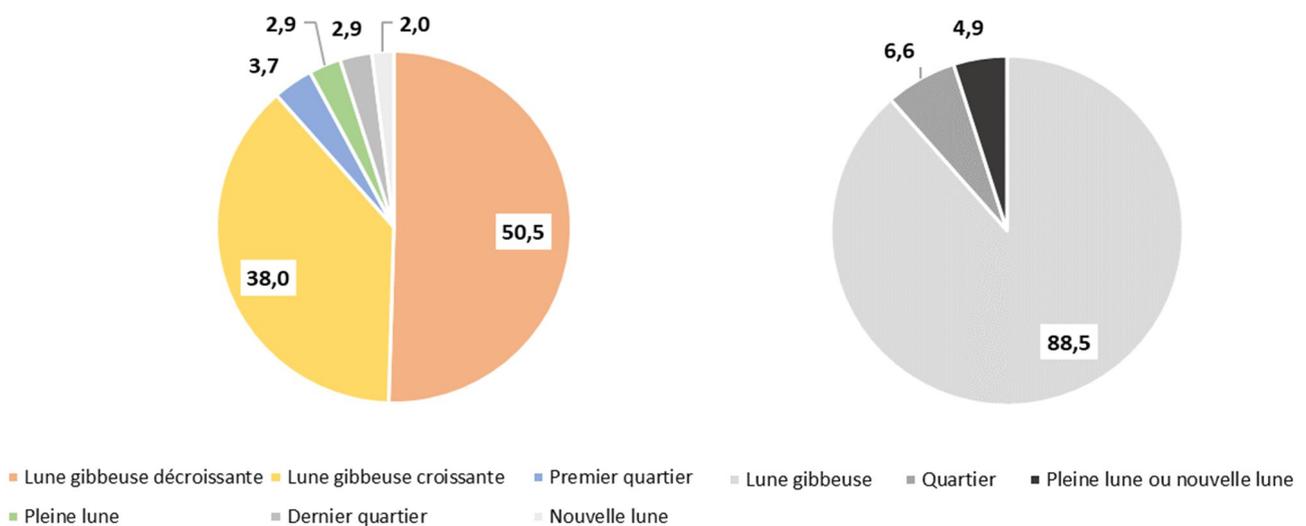


Figure 24 – Pourcentage d'abondance des poissons par cycle lunaire

D'après les deux figures précédentes (figure 24), les jours de pleines ou de nouvelles lunes semblent peu représentés. En effet, dans plus de 95% des cas, le passage n'a pas eu lieu lors de la pleine lune ou de la nouvelle lune. Cela est confirmé par le test de χ^2 ($\chi^2 = 3,130$; $p\text{-value} = 0,372$)

mettant en avant une corrélation non significative entre l'abondance et les cycles lunaires particuliers (Pleine lune, nouvelle lune, premier quartier et dernier quartier). Cependant, les passages ont plutôt lieu dans les journées proches des nuits de pleine lune mais pas forcément le jour-même (Zimecki, 2006). C'est pourquoi est également étudiée une variable permettant de travailler sur la proximité du passage avec des nuits de pleine ou de nouvelle lune (figure 25).

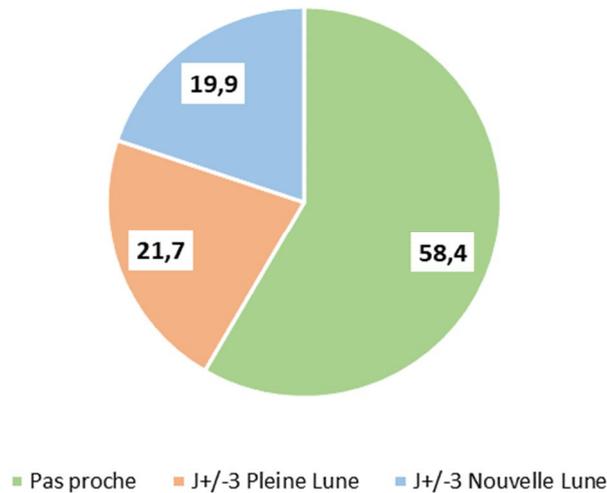


Figure 25 - Pourcentage d'abondance des poissons discriminé par leur proximité à la pleine lune ou à la nouvelle lune

Les résultats semblent plus représentatifs ici avec plus de 40% des passages ayant eu lieu proche d'une nuit de pleine ou de nouvelle lune. Ce résultat ne met tout de même pas en avant une significativité importante de la proximité de la lune sur le nombre de passages piscicoles (figure 25).

Tableau 10 - Résultats des tests de χ^2 (les variables grisées sont considérées comme significatives)

Variables environnementales	χ^2	DDL	p-value (test exact de Fisher)
<i>Cycles particuliers (Pleine lune / Nouvelle lune / 1^{er} quartier / Dernier quartier)</i>	3,130	3	0,372

La littérature considère le cycle lunaire comme important dans les mouvements piscicoles notamment à cause de la luminosité induite, privilégiant par-là les prédateurs comptant principalement sur leur vue pour chasser. En considérant les cycles lunaires pour étudier l'impact de la lune, de nombreuses incertitudes comme la nébulosité ou la turbidité de l'eau ne permettent peut-être pas de mesurer de réels effets sur le comportement de déplacement des poissons.

2.4 Discussion

La littérature s'intéressant aux déplacements piscicoles se concentre majoritairement sur les grands migrateurs amphihalins comme le saumon d'Atlantique (*Salmo salar*), la truite de mer (*Salmo trutta*) ou l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*). Celle-ci demeure pauvre au sujet des migrations holobiotiques des poissons de petits cours d'eau de plaine. Le syndicat JAVO a rétabli la continuité sur l'ensemble du linéaire du Vicoin. Sur cette rivière, plusieurs moyens de franchissements piscicoles ont été installés dont une passe en génie civil équipée d'un Riverwatcher. Cette étude s'intéresse aux déplacements des poissons dans un contexte du centre-ouest français et identifie certaines conditions de migrations en les confrontant à plusieurs variables environnementales : photopériode, débit, température de l'eau, pluviométrie, cycle lunaire et pression atmosphérique. D'après les analyses statistiques et descriptives opérées, il apparaît que le débit, la température, la photopériode et la pluviométrie sont fortement corrélés à l'abondance.

Cependant, cette étude présente plusieurs incertitudes, principalement dues au dispositif de vidéo-comptage Riverwatcher ou au logiciel de bancarisation Winari®. Tout d'abord, le système présente un seuil de détectabilité de 4cm (Baumgartner et al., 2010). De ce fait, les petites espèces de poissons (comme les vairons (*Phoxinus phoxinus*) et les bouvières (*Rhodeus amarus*)) ne sont pas détectables tout comme les juvéniles de la plupart des espèces de poissons présente sur le Vicoin. Cette perte est supposée importante car le passage des jeunes poissons et des petits poissons est tout à fait possible dans cette passe. En effet, sur plusieurs images, le déplacement d'individus de taille suffisante pour déclencher l'enregistrement d'une silhouette a permis de visualiser par la même le passage d'un individu plus petit, qui n'aurait pas activé la passe autrement. Ce n'est donc pas la fonctionnalité de la passe qui discrimine l'ichtyofaune par la taille mais plutôt la détectabilité du dispositif de surveillance qui engendre une perte de données.

Baumgartner et al. (2010) identifie un facteur limitant du scanner dans son fonctionnement. Les rayons infrarouges ont une limite de pénétration au sein de la colonne d'eau avec une perte de l'ordre de 50% de sa pénétrabilité au-delà des 18 cm en eau pure. Les effets de la turbidité occasionnent plus sévèrement la capacité de pénétration des infrarouges et, par conséquent, impacte la détectabilité des poissons en migration. Plusieurs conséquences en découlent : possibilité d'inversion du sens de migration, perte de précision dans la mesure biométrique, sous-estimation du nombre d'individus. Dans le cas du Vicoin, même si la turbidité n'a pu être suivie et quantifiée, elle est néanmoins réelle et des erreurs ont sûrement dû apparaître de ce fait. Celle-ci était variable au cours de l'année, dépendant de la pluviométrie et des périodes agricoles du bassin versant (semi des maïs en mai par exemple). Également, la forte turbidité rendait la détermination de l'espèce très ardue et c'est pourquoi la majeure partie des espèces ont été classées comme indéterminées (58%). Dans l'étude de Baumgartner (2010), l'analyse des silhouettes était réalisée par le logiciel Winari qui réalisait une purge critiquable des silhouettes. Le degré de sous-estimation de l'abondance piscicole était de 56% à 84% selon la turbidité. Le syndicat JAVO a fait le choix de traiter l'ensembles des évènements, tant les vidéos que les silhouettes. Cette méthodologie a permis de bancariser plusieurs évènements qui auraient été éliminés et/ou perdus en laissant les choix de discrimination au Winari. Dans certains cas, aucune silhouette ne permettait d'identifier un poisson mais la vidéo associée démontrait une migration active. La situation contraire a également été constatée avec une silhouette de poisson sans passage en vidéo. Cela a également permis de considérer des passages en bancs comme plusieurs évènements distincts contrairement au Winari qui avait tendance à agréger plusieurs individus en un seul individu de plus grand taille ((Baumgartner et al., 2010). Le système avait ainsi tendance à engendrer une sous-estimation du nombre de poissons et une surestimation de la taille des individus. La taille et la direction des poissons pouvaient être erronées du fait d'une trop forte turbidité et les valeurs de vitesse et les tailles sont également soumises à cette limite.

De plus, le logiciel Winari® calcule la longueur sur la base d'un rapport longueur/hauteur spécifié par l'utilisation qui est basée pour cette étude sur le saumon. Ainsi, les silhouettes engendrées

par le logiciel présentait des contours ressemblant rarement aux espèces indigènes (Baumgartner et al., 2010).

Enfin, et durant la période de suivi du Riverwatcher®, plusieurs pertes de données ont eu lieu. Celles-ci étaient principalement d'ordre technique comme des coupures électriques, des déconnexions entre le scanner et le logiciel Winari, une panne du système d'alimentation électrique du scanner (multiplexer), une infiltration d'eau au niveau du bloc caméra et des erreurs humaines de reconnexion du dispositif à la suite des périodes d'entretien. Ces pertes de données n'ont pas été mesurées précisément lors de l'étude. En effet, l'objectif de cette étude n'est pas de connaître précisément le nombre de poissons mais de mettre en évidence les déplacements des poissons dans une rivière où la continuité est rétablie. Ces biais n'ont ainsi pas fortement impacté ce travail.

Des plages de fonctionnement de la passe à poissons ont été calculées par le bureau d'étude PCM ingénierie en simulant les vitesses d'écoulement, les hauteurs de chutes dans les bassins et les capacités natatoires des espèces cibles (brochet, vandoise et anguille) (Morin, 2017). D'après ces estimations, lors des périodes où le débit du Vicoin est inférieur à $0,09\text{m}^3/\text{s}$, les poissons ne disposent pas de la lame d'eau nécessaire dans la passe pour migrer. A l'inverse, lorsque le débit est trop fort, les poissons migrent généralement par le barrage (en dévalaison ou en montaison si ce dernier est ouvert) ou évite les déplacements en se cachant (Jonsson, 1991 ; Taylor & Cooke, 2012). En pratique, même si aucun évènement migratoire n'est effectivement constaté pour un débit inférieur à cette limite, des migrations sont tout de même notifiées lors des débits supérieurs à $1,8\text{m}^3/\text{s}$. Sur la figure 26 sont mises en évidence les périodes durant lesquelles les passages de poissons sont théoriquement bien évaluées par le Riverwatcher®, environ 8 mois par an.

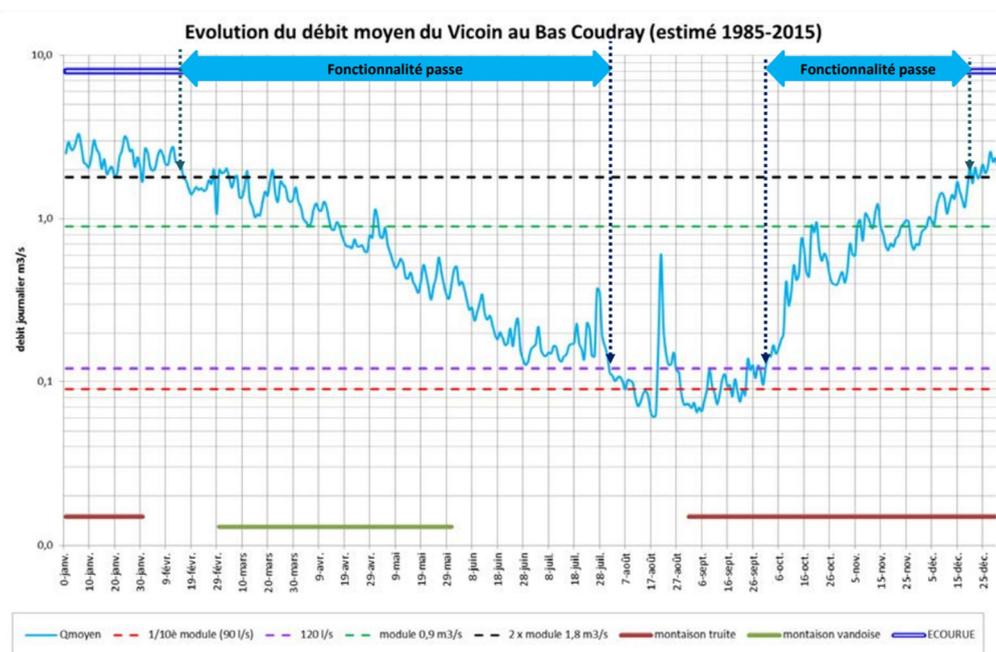


Figure 26 - Evolution du débit moyen sur le Vicoin au bas Coudray (estimé 1985-2015) et débits caractéristiques (Morin, 2017)

Les débits faibles de l'ordre du DMR ne témoignent pas forcément d'un arrêt du déplacement des poissons au sein de la rivière mais plutôt d'un frein structurel dans la conception de la passe qui accentue les ressauts entre les bassins faute de mise en charge suffisante, défavorisant la migration des poissons limités par leur capacité natatoire. Les débits faibles sont également une contrainte environnementale forte pour l'ichtyofaune du fait d'une exposition plus importante à la prédation, aux capacités d'échappement plus faibles et par des allocations énergétiques dont le bilan peut être négatif. Ces cas contraignent les déplacements migratoires et favorisent le stockage des poissons (Jonsson, 1991 ; Taylor & Cooke, 2012). Il n'est pas possible d'identifier les migrations effectuées sur le Vicoin par

les espèces et/ou individus ayant une meilleure capacité natatoire et saltatoire dans le cas de la montaison. Ces individus ne sont de ce fait pas observés par le Riverwatcher. Il en est de même pour les dévalaisons où l'effet de dérives du poisson se fait dans les zones où le débit est le plus important, notamment durant les périodes d'écourues. En effet, les écourues (abaissement des ouvrages pour permettre le transit sédimentaire) sont des pratiques réglementées par arrêtés préfectoraux qui imposent une période d'ouverture totale du clapet, en général sur les périodes hivernales, de façon à assurer la continuité sédimentaire. Lorsque le clapet est ouvert, les poissons auront tendance à passer par le bras principal plutôt que par la passe. Cela engendrerait ainsi une perte d'observation de passage. Également, lors des périodes de très gros débits, le clapet s'ouvre automatiquement, permettant ainsi aux espèces piscicoles et aux sédiments de librement se déplacer. Cependant, ces périodes de forts débits sont rares et les poissons ne semblent pas privilégier les périodes de très fort débit pour se déplacer (Jonsson, 1991).

Malgré ces limites, des résultats importants ont pu être mis en avant. Le débit par exemple est considéré dans la littérature comme une variable prépondérante pour les poissons (Huang et al., 2019 ; Pires et al., 2004, Lamouroux & Cattaneo, 2006 ; Benitez et al., 2015). Il les stimule à migrer et peut ainsi faciliter le passage de certains obstacles en minimisant l'effort nécessaire. Il semblerait ainsi que les migrations piscicoles atteignent un pic lors des débits moyens et diminue grandement lors d'événements hydrauliques importants comme les étiages ou les crues (Prchalová et al., 2011). La significativité du lien entre abondance et débit est démontrée par les résultats du test de sperman et par le test GLM dans lequel est défini comme étant le principal moteur de migration des poissons. Parmi les 3 variables secondaires étudiées concernant le débit (débit moyen journalier, débit moyen de la décade, écart de débit de la journée précédente et du jour même), deux sont corrélées à l'abondance d'après les tests de Pearson effectués : le débit moyen et le débit par décade. Cela tend à mettre en avant une forte réaction des poissons aux variations à moyen terme (la journée) et à long terme (10 jours) et une plus faible réaction aux variations à court terme (delta d'un jour sur l'autre). Cela permet de constater les migrations directement au moment des périodes de forts débits avec les débits moyens journaliers ainsi que les déplacements « à retardement ». Elles peuvent être également liées au décalage du recrutement sur site depuis des zones en aval et en amont.

Une significative relation entre abondance et température a également été démontrée dans cette étude par le test de Sperman et le GLM, confirmant l'importance de cette variable dans les migrations piscicoles comme l'ont démontré d'autres auteurs (Lucas & Batley, 1996 ; Comte & Grenouillet, 2015). La hausse des températures est un facteur de déclenchement de la migration de certaines espèces (Kuczynski et al., 2017 ; Pfauserová et al., 2022). Gardner et al. (2013) ont ainsi mis en avant une relation positive entre la température et l'activité des brèmes, celles-ci parcourant de plus grandes distances cumulées les mois les plus chauds de l'année. De façon similaire, Prchalová et al. (2011) a mis en avant un nombre croissant d'individus passant par les passes à poissons lorsque la température augmente. Dans cette étude, la température de l'eau a été déclinée en deux sous variables : moyenne de la décade et l'écart de la température entre la journée précédente et le jour même. Comme pour les deux auteurs précédents, les deux variables sont significativement corrélées à l'abondance par le test de Spearman et le GLM. La décade semble ainsi plus pertinente que l'écart des températures. Cela pourrait indiquer que les poissons sont plus sensibles à des variations de températures sur le long terme plutôt que des variations rapides d'un jour sur l'autre. Certains pics d'abondance peuvent être dus à l'atteinte d'une température de l'eau adéquate pour la reproduction de certaines espèces de poissons créant ainsi une hausse des mouvements reproductifs. Par exemple et d'après Tissot et Souchon (2010), la brème, l'ablette et la perche, trois espèces présentent sur le Vicoin, présente une gamme de température optimale pour la reproduction entre 15 et 25°C. Certains pics d'abondance comme en juin 2021 ou en mai 2022 sont peut-être dus à l'atteinte de ces températures. Il est également observé que même si le débit est favorable à la migration, les températures basses empêchent ces déplacements et constituent un stimulus plutôt orienté vers un stockage en rivière dans l'attente de meilleures conditions environnementales pour le franchissement.

Sur les figures 21, 22 et 23, les pics de pluviométrie et de température en début d'année par exemple n'ont pas engendré de pics d'abondance aux vues des températures très basses (aux alentours des 7 degrés).

La pluviométrie est également un indicateur environnemental dont l'impact sur les mouvements piscicoles a déjà été mis en avant (De Magalhães Lopes et al., 2018 ; Compte & Grenouille, 2015 ; Philippart, 1990). La pluviométrie induit effectivement une hausse des débits et provoque un dérangement mécanique et sonore chez les poissons, stimulant les déplacements, les poissons recherchant en effet des zones où la pluie est moins forte. Dans cette étude, 3 variables ont été étudiées : La pluviométrie du jour même, la pluviométrie du jour précédent ainsi que le cumul de la pluviométrie des 10 derniers jours. D'après les tests de Spearman effectués seules les deux dernières variables sont significativement corrélées à l'abondance. Le GLM met en avant une plus forte contribution de la pluviométrie du jour précédent et de la décade sur l'abondance plutôt que du jour même. Ces résultats mettent en avant un temps de latence entre le passage des poissons et un événement météorologique ou hydraulique avec ici des événements pluvieux. Les figures 21, 22 et 23 montrent également que la pluviométrie est étroitement liée au débit. C'est une variable qui n'est pas directement liée à la migration mais contributive. Cela se confirme sur les périodes où la pluviométrie est importante sans contribution au débit (absorption, évaporation, prélèvement par la végétation). Ces périodes ne sont, de plus, pas associées à une migration active à la passe à poissons.

Dans cette étude, la photopériode est la variable la plus significativement corrélée à l'abondance d'après le test de Spearman mais présente une contribution relativement faible d'après le GLM. Il a été démontré qu'elle peut impacter les mouvements piscicoles (Prchalová et al., 2011). Les prédateurs semblent en effet profiter d'une hausse de la durée d'ensoleillement pour alourdir leurs pressions prédatrices, jouissant d'une meilleure visibilité (Becker et al., 2013). Il semble d'après l'étude de Pfauserová et al. (2022) et de De Magalhães Lopes (2018) qu'une augmentation de la photopériode engendre des stimulations dans les comportements physiologiques des poissons comme le signal d'une reproduction imminente pour les espèces qui frayent au printemps et au début de l'année. Il peut être associé à ces augmentations de luminosité un effort de prospection induisant une hausse des mouvements migratoires. La figure 27 met en évidence le lien entre photopériode et abondance. Le rythme des saisons entraîne des liens souvent corrélés comme l'augmentation de la durée du jour au printemps et la hausse des températures. Il est supposé que ce sont deux facteurs conjonctifs des stimulus à la reproduction et par conséquent de prospection de zones de frai.

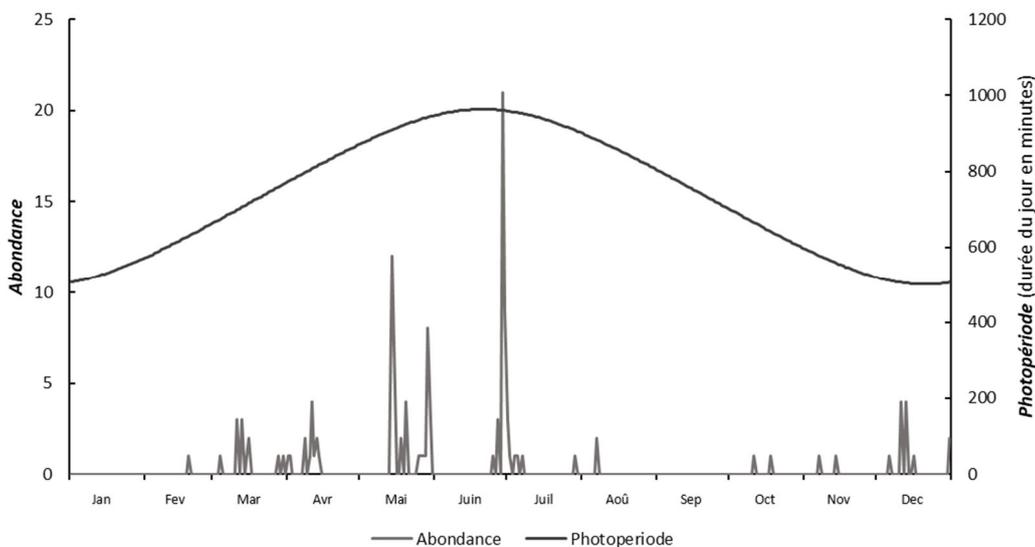


Figure 27 - Représentation de la photopériode et de l'abondance sur une année (2021)

Enfin, aucun effet du cycle lunaire ni de la pression atmosphérique sur l'abondance n'a été mis en évidence dans cette étude. En effet l'impact de la lune sur les poissons n'est pas clair et pourrait venir davantage du degré de luminosité induit plutôt que du cycle lunaire à proprement parler. L'impact de la pression atmosphérique est quant à elle plutôt limitée d'après la littérature aux espèces des milieux lacustres et littoraux (Markham et al., 1991 ; Nakayama et al., 2018 ; Zamorov et al., 2018).

La majorité des déplacements observés sur la passe à poissons sont des migrations de montaisons. Ces mouvements traduisent une recherche d'habitats favorables pour effectuer certains cycles biologiques cités précédemment. Il est cohérent d'observer une proportion plus importante de montaison sur le bilan global des migrations. Un processus de stockage a sûrement lieu à l'aval de la passe. Les poissons attendant des conditions de débit optimales pour dévaler, lors de débits forts, et donc potentiellement en passant par le clapet plutôt que par la passe. Des données de dévalaison sont donc perdues par ce biais. Les mois d'août et de septembre témoignent largement d'un arrêt des déplacements pour des raisons de stress environnementaux. Le facteur limitant étant le débit, la passe perd, de surcroît, sa fonction de transit migratoire.

D'après la littérature, deux pics d'abondance sont généralement attendus (Lucas & Batley, 1996 ; Prchalová et al., 2011 ; Benitez et al., 2015) même si cela est variable en fonction des espèces. Un dans la période printanière, correspondant la période de reproduction et associé à la période de frai, et un deuxième pic en automne correspondant à des mouvements exploratoires vers des refuges thermiques ou de croissance (Benitez et al., 2022). Dans cette étude, le seul pic visible est celui du printemps. Il peut s'expliquer par le complexe des facteurs environnementaux favorables aux besoins de ces espèces sur cette période et par une meilleure détectabilité du système de suivi. Les conditions de débit associé à une faible turbidité augmentent le taux de détection. Le pic attendu en automne-hiver n'apparaît pas ici en partie pour les raisons inverses (augmentation de la turbidité). Ainsi, même si certains passages détectés sont à noter, ceux-ci restent minoritaires par rapport au passage printanier. Un troisième pic, estival, est parfois noté par Benitez et al. (2015) correspondant aux juvéniles. Ce pic n'est pas non plus visible dans cette étude au vue des débits limitants (la passe n'est pas fonctionnelle durant la période estivale) et à cause la sous détection des individus de petites tailles tels que les juvéniles. Il est ainsi à noter un fort passage de février à mai avec quelques variations d'une année sur l'autre (figure 15). Sont visibles sur les figures 21, 22 et 23 un fort passage de février à mai avec des variations interannuelles principalement liées à la pluviométrie plus ou moins intenses et répétées.

Les années 2020 à 2022 semblent présenter des périodes de passages normalisés contrairement aux années 2019-2020 et 2022-2023, présentant des caractéristiques plus atypiques : Une bonne répartition des passages de novembre 2019 à juin 2020 et un pic très important de l'abondance au début de l'année 2023. Les 3 études réalisées à l'échelle de l'espèce montrent les mêmes résultats mais mettent en avant des variations spécifiques quant à l'étendue de la période de passage. Une période large pour les brèmes et très concentrée pour les perches. Le début précoce des passages en 2019 pourrait être dû à une température plus chaude de l'eau que pour les autres années, réduisant ainsi l'impact de la température de l'eau comme facteur limitant le passage en début d'année. Le printemps 2023 montre une très forte activité de migration de montaison. Les événements hivernaux de 2022-2023 étant moins pluvieux, la turbidité était plus faible et a ainsi permis une meilleure visibilité des passages. De plus, les débits ont encouragé les poissons à effectuer des montaisons concentrant ainsi des passages à la passe à poissons. Une seule journée a permis de comptabiliser une migration de 75 individus au total, représentant la meilleure journée de déplacement observée au Riverwatcher. Les conditions d'observations ont permis, d'une part, de les dénombrer et, d'autre part, de les identifier. Ce cas n'a jamais été observé auparavant et peut être considéré comme particulier. L'augmentation visible en 2023 pourrait être due à un effet d'ouverture du cours d'eau à la suite de la restauration de la continuité écologique sur l'ensemble de la rivière effective depuis 2018. Cela pourrait en effet favoriser les comportements exploratoires et peut concerner des individus relativement éloignés du site d'étude. C'est notamment l'hypothèse pour le

brochet avec l'observation récente d'individus de grande taille (>100cm), suspectés de provenir de la rivière la Mayenne à 30 km du site en aval (JAVO, données non publiées).

La brème bordelière et la brème commune n'ont pas été discriminées dans cette étude et font donc partie du même complexe. Celui-ci présente le nombre de poissons identifiés le plus important avec un total de 150 individus. Les périodes de passages des brèmes visibles sur la figure 16 semblent en partie confirmer ce que présente la littérature avec des pics de migrations au printemps (Gardner et al., 2013 ; Donnelly et al., 1998) et en automne. Les passages visibles en automne sont très peu représentés à cause des incertitudes liées au Riverwatcher® développées précédemment. La baisse d'activité en été a une première explication physiologique avec la fin de la période de frai (Gardner et al., 2013) et une seconde en lien avec le fonctionnement de la passe. En effet, les débits estivaux ayant atteint la limite inférieure de franchissement établi à 0,09m³/s.

Le brochet est une espèce holobiotique dont les mouvements migratoires importants sont bien connus. Son pic de migration dans cette étude se déroule au printemps, confortant les propos de certains auteurs (Koed et al., 2006 ; Pauwels et al., 2013) et correspondant à la période de frai. La littérature mentionne également des déplacements importants en été (Kobler et al., 2008 ; Vehanen et al., 2006), le brochet profitant d'une luminosité plus importante et plus durable pour prédater plus efficacement. Ceux-ci n'ont cependant pas été détectés à cause de débit trop faible ne permettant pas le passage des poissons dans la passe. Certaines observations permettent de constater des déplacements rapprochés du brochet, espèce pourtant réputée solitaire. Cela peut-être dû à un temps de latence dû à un temps de prospection pour trouver l'entrée de la passe malgré les turbulents et l'attrait constituant la surverse de l'eau par le clapet.

L'étude comportementale de la Perche met en avant des passages bien plus restreints dans l'année entre mars et mai. La littérature met effectivement en avant la hausse de la température et de la photopériode comme stimulant pour les mouvements des perches (Nakayama et al., 2018). La majorité des observations s'est faite sur l'année 2020 où les conditions d'observations étaient favorables. C'est une espèce bien présente sur le Vicoin qui doit présenter des sous estimations d'effectif au Riverwatcher liées à la turbidité lors des passages.

Avec le dérèglement climatique, les eaux vont se réchauffer (Orr et al., 2014 ; Aawar & Khare, 2020) et les ressources en eau diminuer (Nistor et al., 2019). Les comportements piscicoles en seront ainsi fortement bouleversés. Les hautes températures vont contraindre les poissons thermosensibles à migrer vers des zones présentant des conditions plus susceptibles de correspondre à leur besoin comme à l'amont des cours où l'eau est généralement plus fraîche (Comte & Grenouillet, 2013). Le comportement reproducteur sera également impacté au vu des effets des variations de températures sur la différenciation sexuelle et sur la phénologie des périodes de frai (Servili et al., 2020). De plus, certaines études montrent que d'autres facteurs tels que la demande en eau pour les activités humaines ou les événements météorologiques extrêmes vont encore gagner en ampleur et davantage impacter les populations piscicoles (Miralles-Wilhelm et al., 2017 ; Aawar & Khare, 2020). Ainsi, et d'après Comte & Grenouillet (2013), même si les poissons sont les animaux répondant le plus fortement et le plus rapidement aux impacts du réchauffement climatique, cette adaptation n'est tout de même pas assez rapide au vu des forts bouleversements à venir. Le fait que le Vicoin soit restauré dans sa continuité sur tout son linéaire permettra à l'ichtyofaune d'effectuer des déplacements plus aisément et améliorera ainsi leur résilience face à ces changements.

2.5 Conclusion

Cette étude avait pour but de comptabiliser les passages de poissons et de mettre en corrélation les périodes de migration avec des variables abiotiques déterminées lors d'une recherche bibliographique : Le débit, la pluviométrie, la température de l'eau, la photopériode, la pression atmosphérique et le cycle lunaire. L'analyse effectuée montre une significative corrélation de l'abondance avec le débit, la pluviométrie, la température et la photopériode.

Cette étude a apporté des informations quant à la phénologie de déplacements de l'ichtyofaune de manière générale et sur 3 espèces en particulier : les brèmes, le brochet et la perche. Un fort passage printanier prédomine, généralement dû à des périodes de fraie pour les poissons. La littérature mentionne d'autres pics de mouvements en hiver et en été mais ceux-ci ne sont pas visibles ici à cause des limites liées à l'utilisation du Riverwatcher®.

Effectivement, plusieurs incertitudes sont à prendre en considération. Un débit trop faible en été rend impossible le passage de l'ichtyofaune et une trop forte turbidité en hiver ne permet pas la détection de ceux-ci lors de leur traversée de la passe. Des événements extérieurs comme les périodes d'écourues ou les pannes techniques n'ont pu être clairement identifiés, faute de protocole de pointage adéquat. Les incertitudes inhérentes au Riverwatcher® comme les limites de tailles de poissons détectables ou les erreurs de dénombrement des individus ont été minimisées en passant en revue l'entièreté des vidéos bancarisées par le Riverwatcher®. Il est finalement difficile de comprendre finement le déplacement piscicole au sein du Vicoin et notamment les flux et l'origine du recrutement des individus provenant de l'amont et de l'aval sur les nouvelles zones de d'exploitation des différentes espèces. La passe à poissons du moulin du Bas Coudray est le seul ouvrage de conception à bassins successifs et présente des limites fonctionnelles par rapport aux seuils à rangées régulièrement espacées qui sont les principaux aménagements sur le Vicoin. Il est très difficile de pouvoir estimer les retards de migration occasionnés par ces différents types d'ouvrages de restauration de la continuité ou encore les refus de passage et le temps de transit entre les bassins.

Malgré ces limites, le Riverwatcher® permet de suivre efficacement les migrations holobiotiques des poissons d'eau douces en apportant de surcroit des informations sur le passage (sens de déplacement, vitesse) ainsi que sur la biométrie de l'individu (hauteur, longueur). Cependant, une étude plus approfondie comme le RFID (pour Radio Frequency Identification) pourrait venir conforter et assister cette technologie dans ces suivis. En effet, pour le suivi RFID chaque individu de poisson est équipé d'une puce électronique. Des lecteurs RFID sont à disposer sur le cours d'eau et émettent des signaux détectant les puces à proximité. Ceux-ci renvoient alors un signal contenant un identifiant unique du poisson, qui est collecté par les lecteurs et transmis à un système informatique centralisé pour le suivi et la gestion des poissons. Cette technologie présente un suivis précis et automatisé des poissons tout au long de leur cycle de vie. Elle permet également de collecter des données sur la croissance, la santé et les comportements des poissons, aidant ainsi à la réalisation de mesures de conservation et de gestion adaptées. Le principe de l'étude RFID serait de fractionner le bassin versant du Vicoin en tronçons homogènes, d'équiper ces tronçons d'antennes de collectes. Des pêches électriques seraient à organiser sur plusieurs sites répartis sur le bassin versant pour équiper les poissons de Pit Tag en ciblant les espèces les plus intéressantes en termes de migration. Dans le cadre d'une meilleure connaissance des freins à la migration, il serait intéressant de suréquiper le site du Bas Coudray avec un système à multiples antennes : une antenne aval passe à poissons, une en entrée de passe, une à la sortie et une en amont. Ce complexe aurait pour intérêt de comprendre la sélectivité du dispositif de franchissement, de comprendre les temps de passage et les refus potentiels à la migration, de connaître les flux de poissons transitant par le clapet lors de crue ou d'écourue, de cerner les comportements de certaines espèces.

Annexes

Annexe 1 - Jours supprimés lors de la mise en forme de la base de données

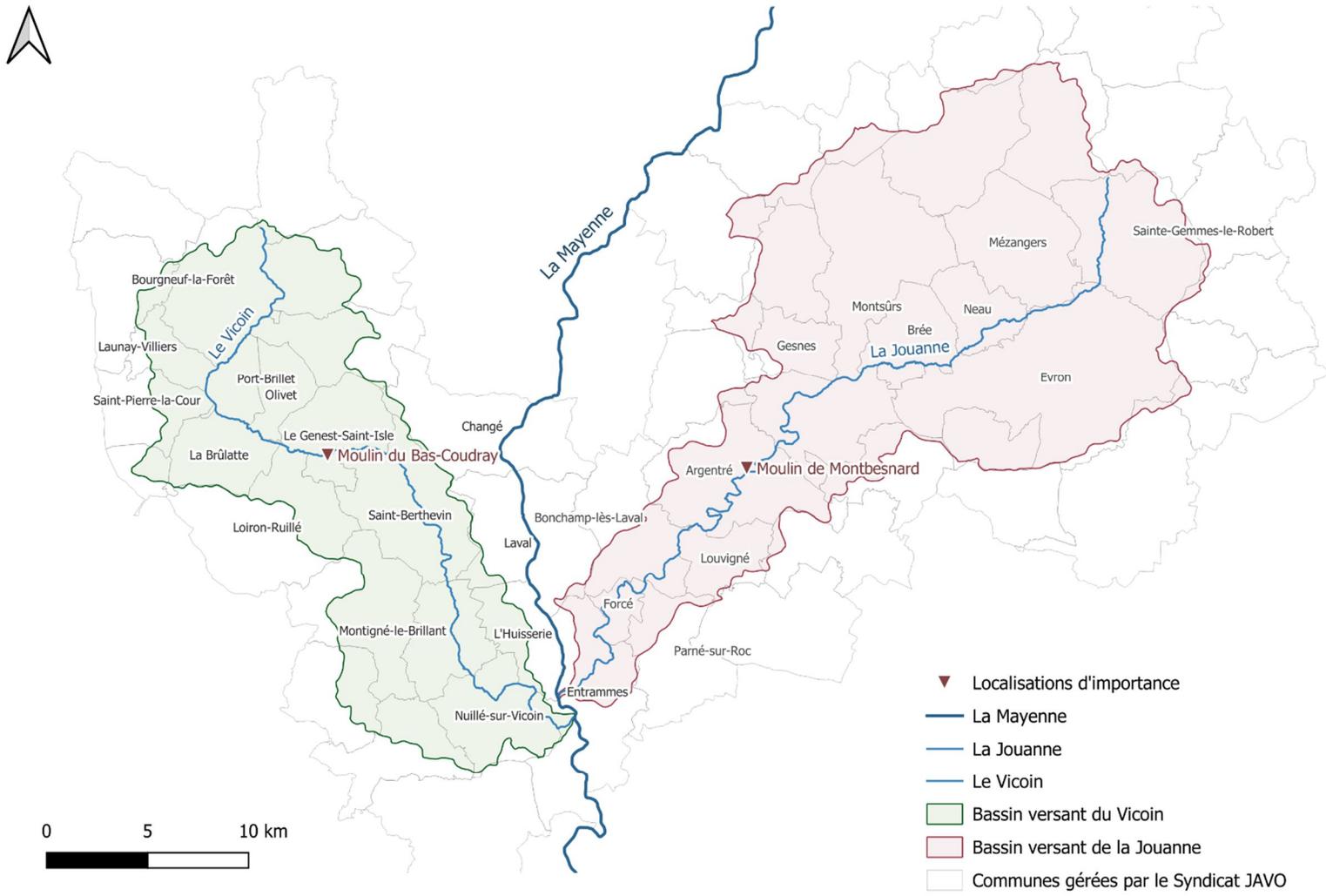
	Date de début	Date de fin	Nombre de jours perdus
2019	15/11/2019	23/11/2019	7
	23/11/2019	26/11/2019	2
	26/11/20019	30/11/2019	3
	04/12/2019	07/12/2019	2
	15/12/0219	19/12/2019	3
	19/12/2019	25/12/2019	5
	28/12/2019	31/12/2019	2
			24

	Date de début	Date de fin	Nombre de jours perdus
2020	31/12/2019	06/01/2020	5
	06/01/2020	09/01/2020	2
	11/01/2020	14/01/2020	2
	19/01/2020	27/01/2020	7
	27/01/2020	01/02/2020	4
	01/02/2020	05/02/2020	3
	06/02/2020	10/02/2020	3
	20/02/2020	23/02/2020	2
	01/03/2020	09/03/2020	7
	17/03/2020	20/03/2020	2
	20/03/2020	25/03/2020	4
	25/03/2020	28/03/2020	2
	28/03/2020	31/03/2020	2
	17/04/2020	20/04/2020	2
	23/04/2020	26/04/2020	2
	14/05/2020	17/05/2020	2
	02/06/2020	06/06/2020	3
	21/06/2020	25/06/2020	3
	16/07/2020	22/07/2020	5
	22/07/2020	01/10/2020	70
	12/10/2020	15/10/2020	2
	26/10/2020	03/12/2020	37
	04/12/2020	10/12/2020	5
	18/12/2020	16/01/2021	13
		189	

	Date de début	Date de fin	Nombre de jours perdus
2021	18/12/2020	16/01/2021	15
	17/01/2021	21/01/2021	3
	21/01/2021	13/02/2021	22
	15/02/2021	19/02/2021	3
	19/02/2021	22/02/2021	2
	25/02/2021	03/03/2021	5
	04/03/2021	09/03/2021	4
	17/03/2021	28/03/2021	10
	03/04/2021	06/04/2021	2
	20/04/2021	23/04/2021	2
	31/05/2021	24/06/2021	23
	08/07/2021	25/07/2021	16
	30/07/2021	03/08/2021	3
	11/08/2021	18/08/2021	6
	18/08/2021	08/10/2021	50
	28/10/2021	04/11/2021	6
	14/11/2021	18/11/2021	3
	01/12/2021	05/12/2021	3
	06/12/2021	09/12/2021	2
	13/12/2021	16/12/2021	2
17/12/2021	27/12/2021	9	
			191

	Date de début	Date de fin	Nombre de jours perdus
2022	13/01/2022	31/01/2022	17
	06/02/2022	16/02/2022	9
	16/02/2022	01/03/2022	11
	12/03/2022	15/03/2022	2
	22/03/2022	25/03/2022	2
	31/03/2022	08/04/2022	7
	24/04/2022	27/04/2022	2
	28/04/2022	02/05/2022	3
	05/05/2022	11/05/2022	5
	12/05/2022	15/05/2022	2
	30/05/2022	02/06/2022	2
	02/06/2022	08/06/2022	5
	13/06/2022	22/06/2022	8
	23/06/2022	07/07/2022	13
	08/07/2022	17/07/2022	8
	04/08/2022	07/08/2022	2
	11/08/2022	15/08/2022	3
	17/08/2022	23/08/2022	5
	23/08/2022	01/09/2022	7
	02/09/2022	06/12/2022	94
06/12/2022	09/12/2022	2	
15/12/2022	19/12/2022	3	
			212

	Date de début	Date de fin	Nombre de jours perdus
2023	05/01/2023	08/01/2023	2
	11/01/2023	14/01/2023	2
	19/02/2023	28/02/2023	8
	02/03/2023	06/03/2023	3
	06/03/2023	09/03/2023	2
	15/03/2023	27/03/2023	11
	26/04/2023	05/04/2023	8
	05/04/2023	09/05/2023	3
	15/05/2023	19/05/2023	3



Annexe 2 - Représentation cartographiques des deux bassins versants étudié dans le cadre du stage



*Suivi des migrations holobiotiques à l'aide d'un piège photo
(Vaki RiverWatcher®) dans un cours d'eau de la Mayenne :
Le Vicoin*

Etudiant :
Pao Canu
IMA
2022-2023

Résumé :

Une passe à poisson en bassins successifs a été confectionnée sur le Vicoin afin de restaurer la continuité écologique. Pour suivre les migrations holobiotiques des poissons d'eau douce sur ce cours d'eau, une caméra Vaki RiverWatcher a été disposée à l'entrée d'une passe à poisson. Cette étude visait à mettre en relation le nombre de passages avec des variables environnementales démontrées comme importantes dans le comportement piscicole par la littérature. D'après les tests statistiques analytiques et descriptifs, la photopériode, la pluviométrie, le débit ainsi que la température de l'eau semblent avoir une importance dans les déplacements des poissons. Il a également été possible de mettre en évidence des périodes de migrations préférentielles. Cette étude met en avant un fort passage printanier. A noter que des incertitudes telles que la turbidité, les débits ou les limites du matériel utilisé sous-estiment très probablement le nombre de passages et ne fait pas apparaître des pics de passages pourtant attendus d'après la littérature, en été par exemple.

Mots Clés : Vaki RiverWatcher®, Migrations holobiotiques, Passe à poissons, variables environnementales, continuité

Entreprise : Syndicat JAVO

Adresse : 5 rue du Pays de Loiron La Chapelle du Chêne, 53 320 Loiron-Ruillé

Tuteur entreprise :
Nicolas Boileau
Technicien de rivière

Tuteur académique :
Catherine Boisneau
Professeure et chercheure

Bibliographie

- Aawar, T., & Khare, D. (2020). Assessment of climate change impacts on streamflow through hydrological model using SWAT Model : A case study of Afghanistan. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1427-1437. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00759-0>
- Abramis brama* summary page. (s. d.). FishBase. Consulté le 17 juillet 2023, à l'adresse <https://fishbase.mnhn.fr/summary/SpeciesSummary.php?ID=268&AT=br%C3%A8me>
- Battaglia, P., Pedà, C., Malara, D., Milisenda, G., MacKenzie, B. R., Esposito, V., Consoli, P., Vicchio, T. M., Stipa, M. G., Pagano, L., Longo, F., & Romeo, T. (2022). Importance of the Lunar Cycle on Mesopelagic Foraging by Atlantic Bluefin Tuna in the Upwelling Area of the Strait of Messina (Central Mediterranean Sea). *Animals*, 12(17), 2261. <https://doi.org/10.3390/ani12172261>
- Baumgartner, L., Bettanin, M., McPherson, J., Jones, M., Zampatti, B., & Beyer, K. (2010, janvier). Assessment of an infrared fish counter (Vaki Riverwatcher) to quantify fish migrations in the Murray-Darling Basin. *NSW Government - Department of Primary Industries*.
- Baxter, R. M. (1977). Environmental effects of dams and impoundments. *Annual review of ecology and systematics*, 8(1), 255-283. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.08.110177.001351>
- Beauchamp, A., Lespez, L., & Delahaye, D. (2017). Impacts des aménagements hydrauliques sur les systèmes fluviaux bas-normands depuis 2000 ans, premiers résultats d'une approche géomorphologique et géoarchéologique dans la moyenne vallée de la Seulles. *Quaternaire*, vol. 28/2, 253-258. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.8153>
- Becker, A., Whitfield, A. K., Järnegren, J., & Næsje, T. F. (2013). Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary-associated fishes. *Journal of Applied Ecology*, 50(1), 43-50. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12024>
- Benitez, J., Dierckx, A., Rimbaud, G., Matondo, B. N., Renardy, S., Rollin, X., Gillet, A., Dumonceau, F., Poncin, P., Philippart, J., & Ovidio, M. (2022). Assessment of Fish Abundance, Biodiversity and Movement Periodicity Changes in a Large River over a 20-Year Period. *Environments*, 9(2), 22. <https://doi.org/10.3390/environments9020022>
- Benitez, J., Matondo, B. N., Dierckx, A., & Ovidio, M. (2015). An overview of potamodromous fish upstream movements in medium-sized rivers, by means of fish passes monitoring. *Aquatic Ecology*, 49(4), 481-497. <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9541-4>
- Boileau, N., & Larivière, T. (2016). Suivi de la contamination du champignon *Phytophthora alni* sur les aulnes *Alnus glutinosa* des cours d'eau du bassin versant du Vicoin. *Bulletin de la société des sciences naturelles de l'ouest de la France*, 32.
- Bordes, J.-L. (2010). Les barrages en France du XVIIIème à la fin du XXème siècle : Histoire, évolution technique et transmission du savoir. *Pour mémoire*, 9, 70-120.
- Chandesris, A., Van Looy, K., Diamond, J. S., & Souchon, Y. (2019). Small dams alter thermal regimes of downstream water. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4509-4525. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4509-2019>

- Chaparro-Pedraza, P. C., & De Roos, A. M. (2021). Individual energy dynamics reveal nonlinear interaction of stressors threatening migratory fish populations. *Functional Ecology*, 35(3), 727-738. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13751>
- Comte, L., & Grenouillet, G. (2013). Do stream fish track climate change ? Assessing distribution shifts in recent decades. *Ecography*, 36(11), 1236-1246. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00282.x>
- Comte, L., & Grenouillet, G. (2015). Distribution shifts of freshwater fish under a variable climate : comparing climatic, bioclimatic and biotic velocities. *Diversity and Distributions*, 21(9), 1014-1026. <https://doi.org/10.1111/ddi.12346>
- De Magalhães Lopes, J., Alves, C., Peressin, A., & Pompeu, P. S. (2018). Influence of rainfall, hydrological fluctuations, and lunar phase on spawning migration timing of the neotropical fish *Prochilodus costatus*. *Hydrobiologia*, 818(1), 145-161. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3601-4>
- Desjardins, J. K., Fitzpatrick, J. M., Stiver, K. A., Van Der Kraak, G., & Balshine, S. (2011). Lunar and diurnal cycles in reproductive physiology and behavior in a natural population of cooperatively breeding fish. *Journal of Zoology*, 285(1), 66-73. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2011.00814.x>
- Donnelly, R., Caffrey, J. M., & Tierney, D. M. (1998). Movements of a bream (*Abramis brama* (L.)), rudd × bream hybrid, tench (*Tinca tinca* (L.)) and pike (*Esox lucius* (L.)) in an Irish canal habitat. Dans *Advances in Invertebrates and Fish Telemetry* (p. 305-308). https://doi.org/10.1007/978-94-011-5090-3_34
- Frimpong, E. A., & Angermeier, P. L. (2010). Trait-Based Approaches in the Analysis of Stream Fish Communities. *American Fisheries Society Symposium*, 73, 109-136. <https://doi.org/10.13140/2.1.4590.7840>
- Gardner, C., Deeming, D. C., & Eady, P. E. (2013). Seasonal movements with shifts in lateral and longitudinal habitat use by common bream, *Abramis brama*, in a heavily modified lowland river. *Fisheries Management and Ecology*, 20(4), 315-325. <https://doi.org/10.1111/fme.12014>
- Gido, K. B., Whitney, J. E., Perkin, J. S., & Turner, T. F. (2015). Fragmentation, connectivity and fish species persistence in freshwater ecosystems. Dans *Cambridge University Press eBooks* (p. 292-323). <https://doi.org/10.1017/cbo9781139627085.011>
- Helms, B. S., Werneke, D. C., Gangloff, M. M., Hartfield, E. E., & Feminella, J. W. (2011). The influence of low-head dams on fish assemblages in streams across Alabama. *Journal of The North American Benthological Society*, 30(4), 1095-1106. <https://doi.org/10.1899/10-093.1>
- Huang, J., Huang, L., Wu, Z., Mo, Y., Zou, Q., Wu, N., & Chen, Z. (2019). Correlation of Fish Assemblages with Habitat and Environmental Variables in a Headwater Stream Section of Lijiang River, China. *Sustainability*, 11(4), 1135. <https://doi.org/10.3390/su11041135>
- Keith, P., Poulet, N., Denys, G., Changeux, T., Feunteun, É., & Persat, H. (2020). *Les poissons d'eau douce de France* (Deuxième édition) [Livre]. MNHN - Museum National d'Histoire Naturelle.

- Kobler, A., Klefoth, T., Wolter, C., Fredrich, F., & Arlinghaus, R. (2008). Contrasting pike (*Esox lucius* L.) movement and habitat choice between summer and winter in a small lake. *Hydrobiologia*, *601*(1), 17-27. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9263-2>
- Koed, A., Balleby, K., Mejlhede, P., & Aarestrup, K. (2006). Annual movement of adult pike (*Esox lucius* L.) in a lowland river. *Ecology of Freshwater Fish*, *15*(2), 191-199. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2006.00136.x>
- Kondolf, G. M. (1997). PROFILE : Hungry Water : Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, *21*(4), 533-551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>
- Kuczynski, L., Chevalier, M. F., Laffaille, P., Legrand, M., & Grenouillet, G. (2017). Indirect effect of temperature on fish population abundances through phenological changes. *PLoS One*, *12*(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175735>
- Kuz'mina, V. V., & Garina, D. V. (2019). Feeding Behavior in Fish : Influence of Long-Term Light Deprivation on Serotonin Effects in the Carp *Cyprinus carpio* L. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, *55*, 475-482. <https://doi.org/10.1134/s002209301906005x>
- Lamouroux, N., & Cattaneo, F. (2006). Fish assemblages and stream hydraulics : consistent relations across spatial scales and regions. *River Research and Applications*, *22*(7), 727-737. <https://doi.org/10.1002/rra.931>
- Le Hingrat, L., & Boileau, N. (2021a). Structure du peuplement piscicole sur deux rivières du bassin versant de la Mayenne, la Jouanne et le Vicoin. *Bulletin de la société des sciences naturelles de l'ouest de la France*, *37*.
- Le Hingrat, L., & Boileau, N. (2021b). Réponses des macro-invertébrés et des poissons à la restauration de la continuité écologique sur deux cours d'eau de plaine de l'ouest de la France. *Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France*, *43*, 27-47.
- Lucas, M. C., & Batley, E. (1996). Seasonal Movements and Behaviour of Adult Barbel *Barbus barbus*, a Riverine Cyprinid Fish : Implications for River Management. *Journal of Applied Ecology*, *33*(6), 1345. <https://doi.org/10.2307/2404775>
- Magilligan, F. J., Graber, B., Nislow, K. H., Chipman, J. W., Sneddon, C., & Fox, C. S. (2016). River restoration by dam removal : Enhancing connectivity at watershed scales. *Elementa*, *4*. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000108>
- Marini, A. (2015, 21 juin). Influence de la pression atmosphérique sur les poissons. *Pêche en Seine-Et-Marne*. <http://www.pecheurdumorin.fr/2015/06/influence-de-la-pression-atmospherique-sur-les-poissons.html>
- Markham J.L., Johnson D.L. & Petering R.W. 1991. White crappie summer movements and habitat use in Delaware Reservoir, Ohio. *North Am.J. Fish. Manag.*, *11*(4) : 504-512
- Matthaei, C. D., & Lange, K. (2015). Multiple stressor effects on freshwater fish : a review and meta-analysis. Dans *Cambridge University Press eBooks* (p. 178-214). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139627085.007>

- Miralles-Wilhelm, F., Clarke, L., Hejazi, M., Kim, S., Gustafson, K., Uñoz-Castillo, R., & Graham, N. T. (2017). Physical impacts of climate change on water resources. Dans *World Bank, Washington, DC eBooks*. <https://doi.org/10.1596/26028>
- Morin, E. (2017). Etude relative à l'aménagement des ouvrages hydrauliques du Bas Coudray sur la rivière du Vicoin. Dans *SEGI*.
- Nakayama, S., Doering-Arjes, P., Linzmaier, S. M., Brieger, J., Klefoth, T., Pieterek, T., & Arlinghaus, R. (2018). Fine-scale movement ecology of a freshwater top predator, Eurasian perch (*Perca fluviatilis*), in response to the abiotic environment over the course of a year. *Ecology of Freshwater Fish*, 27(3), 798-812. <https://doi.org/10.1111/eff.12393>
- Nistor, M., Rai, P. K., Dugesar, V., Mishra, V. N., Singh, P., Arora, A., Kumra, V. K., & Carebia, I. (2019). Climate change effect on water resources in Varanasi District, India. *Meteorological Applications*, 27(1). <https://doi.org/10.1002/met.1863>
- Orr, H. G., Simpson, G., Clers, S. D., Watts, G., Hughes, M., Hannaford, J., Dunbar, M. J., Laize, C., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., & Evans, R. L. (2014). Detecting changing river temperatures in England and Wales. *Hydrological Processes*, 29(5), 752-766. <https://doi.org/10.1002/hyp.10181>
- Pauwels, I., Goethals, P., Coeck, J., & Mouton, A. (2013). Movement patterns of adult pike (*Esox lucius*L.) in a Belgian lowland river. *Ecology of Freshwater Fish*, 23(3), 373-382. <https://doi.org/10.1111/eff.12090>
- Perea, M., Perdomo, D. A., Corredor, Z., González, M., Hernandez-Fonseca, H., & Perea, F. P. (2022). Lunar Cycle Influences Production of Tilapia (*Oreochromis* spp) Eggs in an Intensive Outdoor Production System in the Tropics. *Journal of Biological Rhythms*, 37(2), 177-184. <https://doi.org/10.1177/07487304211069453>
- Pfaušerová, N., Brabec, M., Slavík, O., Horký, P., Žlábek, V., & Hladík, M. (2022). Effects of physical parameters on fish migration between a reservoir and its tributaries. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12231-3>
- Philippart, J. C. (1990, 1 janvier). *Écologie des populations de poissons et caractéristiques physiques et chimiques des rivières dans le bassin de la Meuse belge*. Bulletin de la Société Géographique de Liège. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=3811>
- Pires, A., Da Costa, L. R. F., Alves, M. D. S., & Coelho, M. A. Z. (2004). Fish assemblage structure across the Arade basin (Southern Portugal). *Cybium*, 28(4), 357-365. <https://doi.org/10.26028/cybium/2004-284-007>
- Poulet, N. (2007). Impact of weirs on fish communities in a Piedmont stream. *River Research and Applications*, 23(9), 1038-1047. <https://doi.org/10.1002/rra.1040>
- Prchalová, M., Horký, P., Slavík, O., Vetešník, L., & Halačka, K. (2011). Fish occurrence in the fishpass on the lowland section of the River Elbe, Czech Republic, with respect to water temperature, water flow and fish size. *Folia Zoologica*, 60(2), 104-114. <https://doi.org/10.25225/fozo.v60.i2.a4.2011>
- Prunier, J. G., Loot, G., Veyssiere, C., Poulet, N., & Blanchet, S. (2023). Novel operational index reveals rapid recovery of genetic connectivity in freshwater fish species after riverine restoration. *Conservation Letters*. <https://doi.org/10.1111/conl.12939>

- Servili, A., Canario, A. V., Mouchel, O., & Muñoz-Cueto, J. A. (2020). Climate change impacts on fish reproduction are mediated at multiple levels of the brain-pituitary-gonad axis. *General and Comparative Endocrinology*, 291, 113439. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2020.113439>
- Seyedhashemi, H., Moatar, F., Vidal, J., Diamond, J. S., Beaufort, A., Chandesris, A., & Valette, L. (2021). Thermal signatures identify the influence of dams and ponds on stream temperature at the regional scale. *Science of The Total Environment*, 766, 142667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142667>
- Skalak, K., Benthem, A., Schenk, E. R., Hupp, C. R., Galloway, J. M., Nustad, R. A., & Wiche, G. J. (2013). Large dams and alluvial rivers in the Anthropocene : The impacts of the Garrison and Oahe Dams on the Upper Missouri River. *Anthropocene*, 2, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2013.10.002>
- Tissot, L., & Souchon, Y. (2010). Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. *Hydroécologie appliquée*, 17, 17-76. <https://doi.org/10.1051/hydro/2010004>
- Van Looy, K., Tormos, T., & Souchon, Y. (2014). Disentangling dam impacts in river networks. *Ecological Indicators*, 37, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.10.006>
- Vehanen, T., Hyvärinen, P., Johansson, K. E., & Laaksonen, T. (2006). Patterns of movement of adult northern pike (*Esox lucius* L.) in a regulated river. *Ecology of Freshwater Fish*, 15(2), 154-160. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2006.00151.x>
- Vigneron T. & Oberdoff T. (2010). Peuplements de poissons et anthropisation du milieu : Le cas des systèmes potamiques du bassin de la Loire. ONEMA.
- Vowles, A. S., & Pompeu, P. S. (2012). Effects of light on the behaviour of brown trout (*Salmo trutta*) encountering accelerating flow : Application to downstream fish passage. *Ecological Engineering*, 47, 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.021>
- Weibel, D., & Peter, A. (2013). Effectiveness of different types of block ramps for fish upstream movement. *Aquatic Sciences*, 75(2), 251-260. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0270-7>
- Zamorov, V., Karavanskiy, Y. V., Leonchuk, Y., Gandzyura, V. P., & Kvach, Y. (2018). The effect of atmospheric pressure and water temperature on the swimming activity of round goby, *Neogobius melanostomus* (Actinopterygii : Perciformes : Gobiidae). *Acta Ichthyologica Et Piscatoria*. <https://doi.org/10.3750/aiep/02445>
- Zimecki, M. (2006). The lunar cycle : Effects on human and animal behavior and physiology. *Postepy Hig Med Dosw (online)*, 60, 1-7.