

Etude du comportement de dévalaison des smolts de saumon atlantique en amont de la centrale hydroélectrique de Mery dans le bassin de la Meuse

Auteur : Renardy, Séverine

Promoteur(s) : Ovidio, Michael

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en biologie des organismes et écologie, à finalité approfondie

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5403>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Analyse des comportements de franchissement des barrages de la basse Ourthe par des smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*)



Université de Liège

Faculté des Sciences - Département Biologie, Ecologie, Evolution

UR FOCUS- Unité de Biologie du comportement

Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydro-écologie (LDPH)

**Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention
du grade de Master en Biologie des Organismes et Ecologie,
à finalité approfondie**

Séverine Renardy

Sous la supervision du Dr. Michaël Ovidio

Septembre 2018

Remerciements

Avant tout, je souhaite remercier mon promoteur, Dr. Michaël Ovidio, pour m'avoir donné l'opportunité d'intégrer son service de recherche et pour avoir mis tout en œuvre pour trouver un sujet correspondant à mes attentes, un sujet qui m'a passionnée. Merci pour votre encadrement, vos conseils avisés et votre confiance.

Je tiens à remercier le Dr. Jean-Philippe Benitez pour sa disponibilité et le temps consacré à m'aider, notamment pour le traitement des données et l'analyse des résultats.

Je remercie aussi Arnaud Dierckx pour toutes ces journées de terrain mais également pour le partage de ses précieuses connaissances sur les poissons, qui m'ont permis de découvrir un domaine que je connaissais peu. Merci pour toutes ces rencontres avec ces êtres majestueux que sont le silure et l'aspe.

Ensuite, je souhaite remercier Amandine Tauzin, une étudiante française, sans qui ce mémoire n'aurait pas eu la même tournure.

Je remercie sincèrement toute l'équipe du laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydro-écologie (LDPH), pour m'avoir encadrée et épaulée lors de toutes ces longues nuits consacrées à la récolte des données. Et un merci particulier à Gilles et à Dylan pour avoir accepté de nous aider à plusieurs reprises lors des pistages.

Enfin, je désire remercier mon comité de lecture, Johann Delcourt, Dr. Christian Michel & Orphal Colleye pour avoir accepté de lire mon mémoire.

Source de la photo de couverture :

© J. M. Bach - LOGRAMI

www.logrami.fr/publications/photographies/

Résumé

Analyse des comportements de franchissement des barrages de la basse Ourthe par des smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*)

Séverine Renardy

Promoteur : Dr. Michaël Ovidio
Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydro-écologie
Année académique 2017-2018

Dans le bassin de la Meuse, la stabilité et la survie des populations de saumons atlantiques (*Salmo salar*), une espèce migratrice anadrome, sont principalement menacées par la présence de nombreux ouvrages hydro-électriques le long des cours d'eau. Même si pour la montaison, cette menace est en passe d'être résolue, la dévalaison représente toujours un gros point noir dans les programmes de réintroduction.

L'objectif principal est d'améliorer nos connaissances sur les comportements fins de recherche de voies de passage pour des smolts de saumons atlantiques en phase de dévalaison vers la mer. Nous avons sélectionné l'ouvrage hydro-électrique de Méry, un site d'étude intéressant de par sa configuration (plusieurs voies de passage, deux types de turbines, un exutoire de dévalaison, une échelle à poisson) et sa position dans l'axe migratoire (la basse Ourthe juste avant la confluence avec la Meuse). Un second objectif était de poursuivre le monitoring historique du piège de l'exutoire de dévalaison, entre mars et juin 2018, afin de préciser les facteurs environnementaux déclencheurs de la dévalaison.

Pour la partie comportementale, n=217 smolts, de la pisciculture d'Erezée, ont été répartis en 4 lots et déversés à 4 périodes différentes (9/04, 19/04, 26/04 et 17/05). Ils ont ensuite été suivis à l'aide de la télémétrie radio manuelle (n=17 smolts) et de systèmes automatisés RFID (n=200 smolts).

Les smolts ont généralement franchi le barrage de Méry par la 1^{ère} voie de passage rencontrée. L'exutoire de dévalaison a été la voie la plus attractive au détriment de la vis d'Archimède. L'utilisation des voies de passage est influencée par le débit de l'eau avec une augmentation de l'utilisation de l'exutoire lorsque le débit diminue. Le délai de franchissement du barrage de Méry varie entre 4min à 22h46 et les smolts le franchissent généralement avant le début du crépuscule. Ils dévalent ensuite l'Ourthe en moyenne à 0,25m/s, vitesse influencée notamment par la présence de plusieurs barrages dont le délai de franchissement varie en moyenne entre 1min35 et 4h22. En ce qui concerne le monitoring saisonnier du piège de l'exutoire de dévalaison, l'année 2018 permet d'affiner nos connaissances sur les rythmes de migration.

L'ensemble des résultats obtenus contribue à une amélioration de nos connaissances sur le comportement de négociation des ouvrages hydro-électriques avec la mise en évidence sur le site de Méry, de l'importance de l'exutoire de dévalaison et la faible attractivité de la vis d'Archimède.

Table des matières

1. Introduction générale	1
1.1. Le cycle de vie du saumon atlantique	1
1.2. Etat des stocks et causes du déclin	3
1.2.1. Programmes de réintroduction en Europe	5
1.3. Le phénomène de dévalaison	7
1.3.1. La dévalaison en situation naturelle et ses facteurs déclencheurs	7
1.3.2. Perturbation de la dévalaison par l'anthropisation des rivières.....	9
1.3.3. Moyens mis en œuvre pour faciliter la dévalaison	10
1.4. Comportement des smolts en amont d'un obstacle anthropique.....	11
1.5. Objectifs de l'étude	12
2. Matériels et méthodes	13
2.1. Bassin de la Meuse	13
2.1.1. Barrage de Méry.....	15
2.2. Acquisition des données.....	17
2.2.1. Marquage des poissons.....	17
2.2.1.1. Emetteurs radios	17
2.2.1.2. Marques RFID	18
2.2.2. Déversement des poissons.....	19
2.2.3. Suivi des smolts par la technique de télémétrie radio.....	19
2.2.4. Suivi des smolts par la méthode RFID	20
2.3. Analyses comportementales	21
2.4. Monitoring du piège à la dévalaison	22
2.5. Analyses des données et tests statistiques	22
3. Résultat.....	24
3.1. Description des comportements individuels de dévalaison	24
3.1.1. Smolts du lot n°1	24
3.1.2. Smolts du lot n°2	25
3.1.3. Smolts du lot n°3	27
3.1.1. Smolts du lot n°4	30

3.2.	Attractivité et efficacité des voies de passage	31
3.2.1.	Définition des zones de concentration	32
3.2.2.	Utilisation des voies de passage.....	34
3.2.3.	Essai d'estimation de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison	35
3.2.4.	Délai de franchissement associé à chaque voie de passage.....	35
3.3.	Influence des conditions environnementales et variables morphologiques sur le comportement de dévalaison	36
3.3.1.	Influence du débit de l'eau sur le choix d'une voie de passage	36
3.3.2.	Influence de la taille des individus sur le choix d'une voie de passage	37
3.3.3.	Rythme journalier de migration	37
3.4.	Patrons de migration après le passage de Méry	39
3.4.1.	Vitesse de progression des smolts	39
3.4.2.	Comparaison des vitesses de migration dans différents biefs de l'Ourthe	39
3.4.3.	Comparaison des délais de franchissement pour les différents barrages de l'Ourthe	40
3.5.	Monitoring du piège de l'exutoire de dévalaison	40
4.	Discussion.....	43
4.1.	Adéquation des méthodes utilisées	43
4.2.	Comportement en amont du barrage de Méry	44
4.2.1.	Comportement d'approche et choix d'une voie de passage	44
4.2.2.	Délai de franchissement du barrage de Méry.....	46
4.2.3.	Influence du débit de l'eau sur le choix d'une voie de passage	47
4.2.4.	Influence de la taille sur le choix d'une voie	48
4.3.	Patterns de migration.....	48
4.3.1.	Rythme journalier de migration	48
4.3.2.	Vitesse de progression des smolts en aval du barrage de Méry	49
4.4.	Monitoring du piège de l'exutoire de dévalaison	50
5.	Conclusions et perspectives	52
6.	Bibliographie	53

1.Introduction générale

1.1. Le cycle de vie du saumon atlantique

Le saumon atlantique (*Salmo salar* L.) est une espèce appartenant à la famille des Salmonidae. Son aire de répartition recouvre l'Europe, l'Amérique du Nord, le Groenland et englobe les océans, les mers, les lacs et les rivières (Davaine et Prouzet, 1994 & Parrish et al., 1998 & Prignon, 1999 & Glass, 2010). Le saumon atlantique est considéré comme un bio-indicateur de la qualité des eaux (Monnerjahn, 2011). En effet, on le retrouve uniquement dans les rivières de bonne qualité dont le courant est rapide, l'eau très bien oxygénée et le substrat non colmaté (Davaine et Prouzet, 1994). Cette caractéristique lui confère le statut d'espèce drapeau, permettant l'évaluation du succès des programmes de restauration des rivières (Monnerjahn, 2011). Le saumon atlantique est une espèce migratrice diadrome anadrome, qui réalise des migrations entre les eaux douces et le milieu marin au cours de sa vie (Fig. 1) (Davaine et Prouzet, 1994 & Klemetson et al., 2003).

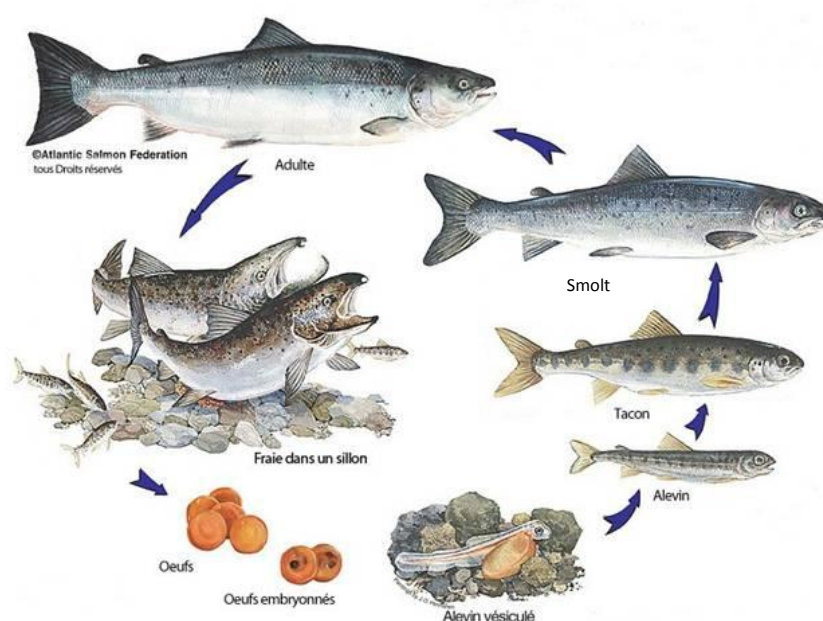


Figure 1 : le cycle biologique du saumon atlantique avec les différents stades de développement (J.O. Penanen, Fédération du saumon atlantique)

La reproduction et la ponte se déroulent en eau douce d'octobre à janvier. Les sites de reproduction sont caractérisés par une faible profondeur de l'eau (20 à 35 cm) et une vitesse de courant moyenne (40 à 65 cm/s) au niveau du faciès d'écoulement qui permettent une bonne oxygénation du substrat, constitué d'éléments grossiers tels que des pierres ou des cailloux non colmatés (Bardonnet et Baglinière, 2000 & Moir, Soulsby et Youngson, 1998). La femelle creuse un nid à l'aide de sa nageoire caudale. Les œufs y sont déposés et

rapidement fécondés par les mâles qui sont à proximité. Le nid est ensuite recouvert de gravier et défendu par la femelle (Beall, 1994).

Les œufs éclosent au printemps après 70 à 160 jours d'incubation (Peterson, Spinney et Sreedharan, 1977 & Mills, 1989). Pendant 2 à 15 semaines, les alevins sont munis d'un sac vitellin leur fournissant les nutriments nécessaires pour leur croissance (Dill, 1977 & Heland et Dumas, 1994). Une fois la ressource vitelline épuisée, les alevins émergent du substrat, 4 à 7 mois après la ponte en fonction de la température de l'eau, principalement en période nocturne (Bardonnnet et Baglinière, 2000). Certains restent sur le lieu de naissance alors que d'autres sont emportés jusqu'à 1000m en aval (Armstrong, 1998).

Les alevins deviennent des tacons et, selon la latitude et le régime thermique de la rivière ce stade de développement peut durer entre 1 et 8 ans (McCormick et al., 1998 & Klemetson et al., 2003). L'habitat préférentiellement utilisé par les tacons est un milieu dont la profondeur varie entre 5 et 90 cm et la vitesse de courant entre 0,1 à 0,8m/s (Heggenes, 1990 & McCormick et al., 1998).

Lors du printemps précédent la dévalaison vers la mer, le tacon entame une transformation, « la smoltification », qui est une véritable préadaptation à la vie marine (Heland et Dumas, 1994). Ce processus endogène est nécessaire pour amorcer la dévalaison via des modifications physiologiques, morphologiques et comportementales (Duston et Saunders, 1990).

- Changements physiologiques : la smoltification accroît la tolérance à l'eau de mer et favorise la croissance (McCormick et al., 1998 & Scruton et al., 2007). La tolérance à l'eau de mer est permise grâce à des changements s'opérant au niveau des reins, de l'intestin, de la vessie et des lamelles branchiales (McCormick et Saunders, 1987).
 - Intensification de l'activité des pompes Na^+/K^+ ATPase et prolifération de cellules à chlorure au niveau des branchies
 - Augmentation de la perméabilité des membranes de l'intestin (Bœuf, 1993)
 - Diminution de l'activité des reins et de la vessie (McCormick et Saunders, 1987)
- Changements morphologiques : la livrée des individus devient argentée avec l'apparition d'un liséré noir sur les nageoires.
- Modifications comportementales : leur territorialité et leur agressivité diminuent pour laisser place à un comportement grégaire avec formation de bancs (Bœuf, 1993).

La dévalaison est une migration hautement directionnelle, synchronisée et effectuée par la majorité des smolts (McCormick et al., 1998 & Fjelstad, Alfredsen, et Boissy, 2014). Suivant la latitude, la dévalaison vers la mer débutera à des périodes différentes (Martin et al., 2012). Celle-ci s'initie vers mars-avril à faibles latitudes (Bœuf, 1993) et vers juin-juillet à hautes latitudes (Davidsen et al., 2005). Lors de la migration, les smolts s'imprègnent des

caractéristiques de leur rivière natale afin de pouvoir y retourner au stade adulte lors de la période de fraie, ce qu'on appelle le « homing » (McCormick et al., 1998). Suivant les caractéristiques du smolt, la salinité et les conditions environnementales, le temps passé dans l'estuaire varie de 2-3 jours (Moore et al., 1995 & Tytler, Thorpe et Shearer, 1978 & Thorpe, 1994) mais peut dans certains cas atteindre 1 an (Robitaille et al., 1986).

Les populations de nos rivières migrent jusqu'aux îles Féroé et au Groenland (Davaine et Prouzet, 1994 & Mills, 1989). Le saumon reste entre 14 et 36 mois dans l'océan pour grandir et s'engraisser (Klemetson et al., 2003). Une fois mature, ils retournent en rivière (Klemetson et al., 2003). Ils peuvent parcourir jusqu'à 5000 kilomètres sans se nourrir, uniquement grâce à leurs réserves. Suivant les rivières, les remontées des géniteurs ont lieu à des périodes différentes au cours de l'année. Deux périodes se distinguent : février-juillet et septembre-janvier (Mills, 1989). Jusqu'à 25% des saumons, appelés « kelts » en anglais, survivent après la reproduction, retournent en mer et reviennent en rivière l'année suivante (Klemetsen et al., 2003 & Niemelä et al., 2006). Quelques écotypes particuliers peuvent être également observés. Certains individus n'effectuent pas de dévalaison vers la mer alors que d'autres, appelés « land-locked salmon », vont dévaler jusqu'à un lac pour croître (McCormick et al., 1998 & Enders et al., 2007).

1.2. Etat des stocks et causes du déclin

Le saumon atlantique a montré des signes de déclin lors de la révolution industrielle au 19^e siècle (Boisclair, 2004 & Monnerjahn, 2011 & Havn et al., 2017). Vers les années 1930 et 1950, il a disparu de la plupart des rivières d'Allemagne, de Belgique et des Pays-Bas dans le bassin du Rhin et de la Meuse (Philippart et al., 2016 & Malbrouck, Micha et Philippart, 2007 & MonnerJahn, 2011). En 1998, l'état des populations européennes s'est dégradé (Fig. 2). Au Nord de l'Europe, notamment en Norvège, Suède et Finlande, les populations ont décliné progressivement et en Europe centrale, notamment en Allemagne, Pologne et Estonie, l'espèce avait majoritairement disparu. En Europe de l'Ouest, l'état des stocks est plus variable et dépend du pays. Au niveau des îles Britanniques, les populations écossaises et irlandaises restent stables alors que celles d'Angleterre et du Pays de Galles sont en déclin ou disparues (Parrish et al., 1998). En France, les populations qui subsistent se trouvent en Bretagne et en Normandie (Bresles et Arques), mais aussi sur l'Allier, les Gaves d'Oloron (Baglinière, Thibault et Dumas, 1990). En Amérique du Nord et au Groenland, le saumon est resté généralement plus stable. On observe tout de même quelques régions où les populations ont décliné ou disparu notamment dans le Maine et le Connecticut (Parrish et al., 1998).

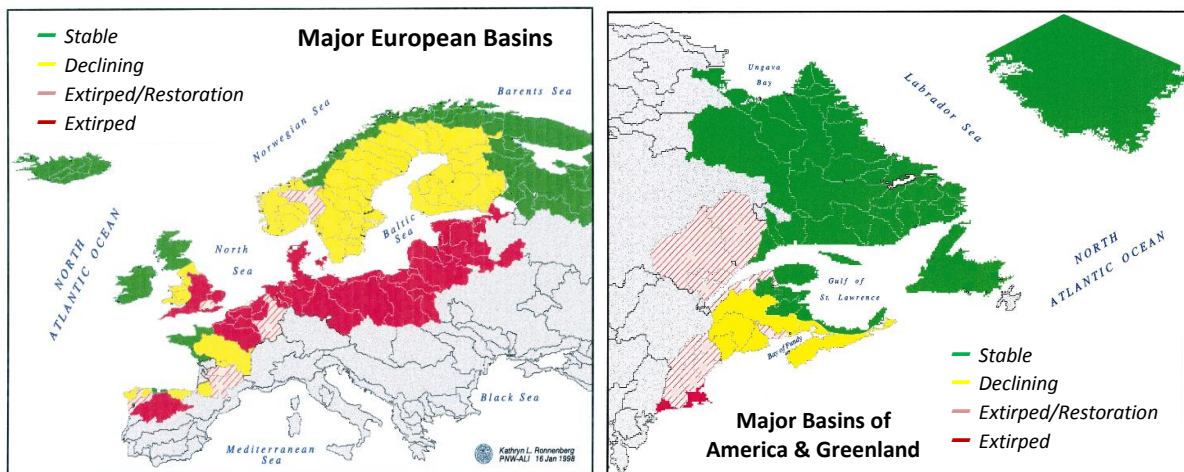


Figure 2 : Etat des populations de saumon atlantique d'Europe, d'Amérique du Nord et du Groenland par Kathryn Ronnenberg (Parrish et al., 1998)

La subsistance des populations de saumon atlantique a été mise à mal suite à de nombreux facteurs principalement engendrés par l'homme.

1. La pêche intensive dans les estuaires et les mers ainsi que le braconnage (Philippart et al., 2016 & Parrish et al., 1998).
2. L'augmentation globale de la température de l'eau (MacCrimmon et Gots, 1979) augmentant le risque d'atteindre la limite supérieure létale de 30°C (Elson, 1969 in Jonsson, 1991).
3. L'acidification des rivières, causée par des pluies acides d'oxyde d'azote et de soufre, perturbe la physiologie des saumons (Mills, 1989 & Parrish et al., 1998).
4. Le prélèvement de l'eau de la rivière à des fins industrielles et domestiques engendre une modification de l'hydrologie du cours d'eau et de son régime thermique (Mills, 1989 & Baras et Lucas, 2001 & Parrish et al., 1998).
5. La pollution de l'eau causée par les activités anthropiques telles que l'agriculture et l'urbanisation (Monnerjahn, 2011 & Baras et Lucas, 2001 & Mills, 1989). Ces polluants sont répartis en 7 catégories; substances chimiques, solides, radioactives ou pétrolières, variations de température ou désoxygénation de l'eau et sels non toxiques (Mills, 1989). Ils représentent des perturbateurs endocriniens, physiologiques et comportementaux (Kavlock et al., 1996 & Mills, 1989 & Baras et Lucas, 2001).
6. La modification et la canalisation des cours d'eau engendrent une homogénéisation et une destruction des habitats, comme les frayères (Philippart, 2008 & Enders et al., 2007 & Admiraal et al., 1993 & Baras et Lucas, 2001). De plus, une altération des habitats modifie la qualité physico-chimique des rivières (Fig. 3) (Brookes, 1988).

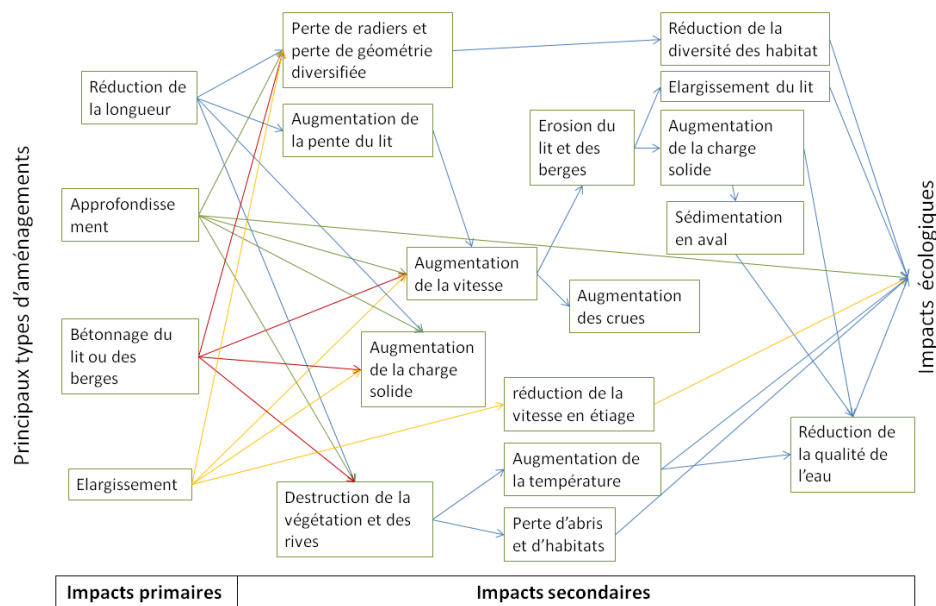


Figure 3 : Effets primaires et secondaires des aménagements sur les populations de saumon atlantique (modifié à partir de Brookes, 1988)

7. Les barrages hydro-électriques sont considérés comme la plus grande menace pour la stabilité et la survie de cette espèce (Larinier, 2001 & Holbrook et Kinisson, 2011 & Fjelstad et al., 2012 & Thorstad et al., 2017). Ils engendrent une fragmentation de l'habitat (Enders et al., 2007 & Admiraal et al., 1993) réduisant ou bloquant la libre circulation des poissons (Baglinière et al., 1990). Les saumons adultes n'arrivent plus à remonter les rivières pour frayer et les smolts de dévaler pour atteindre la mer pour grandir (MacCrimmon et Gots, 1979 & Steinbach, 2001). De plus, la construction de barrages est associée à une altération des caractéristiques naturelles du cours d'eau, telles qu'une réduction du caractère lotique, une augmentation de sa température (Havn et al., 2017 & Thorstad et al., 2012 & Parrish et al., 1998) mais également la perte des sites de frayères (Steinbach, 2001).

1.2.1. Programmes de réintroduction en Europe

Après l'extinction de l'espèce, plusieurs programmes de réintroduction ont dès lors vu le jour en Europe (Baglinière et al., 1990 & Larinier et Travade, 1998 & Monnerjahn, 2011 & Philippart et al., 2016). Pour qu'un programme de réintroduction soit un succès, il est impératif d'avoir une vision plus intégrée de l'écosystème rivière, en permettant les usages, mais en tenant compte également des besoins des espèces de poissons les plus exigeantes comme notamment le saumon atlantique (Prignon, 1999). En France par exemple, un programme national de réintroduction, le « Plan Saumon », a été mis en place en 1975 (Baglinière et al., 1990). En Allemagne, vers 1987, le programme « Saumon 2000 » suivi du

« Rhine 2020 » ont été mis en place (Schneider, 2011). En Belgique, c'est en 1987 dans le cadre de l'année européenne de l'environnement que naît l'idée d'établir un programme de réintroduction du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse, le projet « Saumon 2000 ». Afin de rétablir des populations stables en Wallonie, de nombreuses actions ont été planifiées.

1. Déterminer les rivières dont le potentiel d'habitat est susceptible d'accueillir des saumons de repeuplement, provenant d'autres pays, comme l'Ourthe et d'autres rivières ardennaises. Et faire un état des lieux en inventoriant les nombreux barrages présents.
2. Sélectionner une nouvelle lignée de souche écossaise, irlandaise ou française suite à la disparition totale des populations de saumons « mosans » pour ensuite être déversés dans nos rivières (Malbrouck, 2007).
3. Améliorer la qualité physico-chimique de l'eau via des stations d'épuration, pour permettre la survie de l'espèce (Admiraal et al., 1993 & Monnerjahn, 2011 & Philippart et al., 2008 & 2016).
4. Restaurer la libre circulation pour les saumons lors de la montaison et la dévalaison (Baglinière et al., 1990 & Admiraal et al., 1993 & Prignon, 1999). En ce qui concerne la montaison, de nombreuses échelles à poissons au niveau des barrages ont été mises en place dans un ordre stratégique.
5. Créer une pisciculture, le « Conservatoire du Saumon Mosan » qui joue un rôle essentiel dans la réintroduction du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse à partir de reproductions artificielles et qui favorise l'augmentation du stock de juvéniles déversés en rivières.

L'installation de pièges de contrôle au niveau des passes migratoires, et notamment à l'entrée de la Meuse belge à Lixhe a permis de mettre en évidence le retour effectif de saumons atlantiques adultes dans nos rivières, avec une première capture en 2000. Le nombre de captures a progressivement augmenté et plus particulièrement les 6 dernières années avec un record en 2015 où 53 saumons ont été capturés en Meuse à Lixhe et 6 dans l'Ourthe aux Grosses Battes (Fig. 4) (Dierckx et al., 2017).

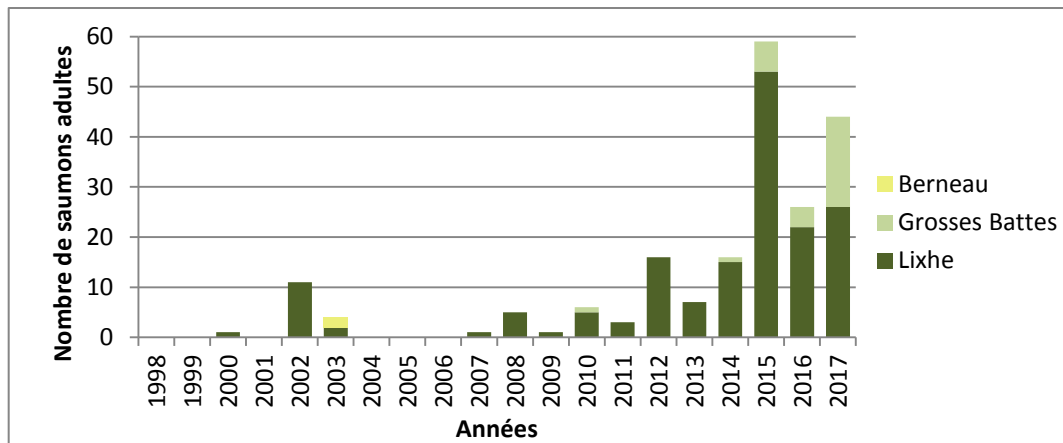


Figure 4: Les remontées de saumons Atlantiques dans l'échelle à poissons du barrage de Lixhe sur la Meuse, des Grosses Battes sur l'Ourthe et de Berneau sur la Berwinne entre 1998 et 2017

Malgré ce saut quantitatif des captures ces dernières années, le nombre de géniteurs adultes est insuffisant pour que la population soit auto-suffisante. C'est pourquoi, la reproduction artificielle est encouragée afin de soutenir les populations et d'augmenter le stock à l'aide de reempoissonnements (Monnerjahn, 2011 & Admiraal et al., 1993). Deux gros points noirs subsistent avant que le programme Saumon soit un véritable succès ; (i) le barrage anti-tempête du Haringvliet reste un obstacle majeur pour l'entrée des saumons adultes en montaison au niveau de l'embouchure de la Meuse. Ce problème devrait être partiellement résolu en automne 2018, avec une gestion plus respectueuse des vannes du barrage pour permettre des mouvements migratoires aux périodes clés. Ensuite, (ii) la dévalaison des smolts au niveau des affluents et surtout de la Meuse reste un problème majeur puisque des études récentes de télémétrie acoustique ont démontré que le taux d'échappement Ourthe-Meuse Hollandaise ne dépassent pas les 6% et que de nombreux smolts sont attirés par le canal Albert, qui est une voie non favorable (Ovidio et al., 2015). C'est pour cette raison que les études sur la dévalaison au droit des ouvrages hydro-électriques sont prioritaires.

1.3. Le phénomène de dévalaison

1.3.1. La dévalaison en situation naturelle et ses facteurs déclencheurs

Après la smoltification, le smolt s'oriente en rhéotaxie négative (tête orientée vers l'aval) et entame la dévalaison (Davidsen et al., 2005 & McCormick et al., 1998 & Martin et al., 2012). Dans les milieux tempérés, la migration a majoritairement lieu au crépuscule, mais également pendant la nuit (Riley, Eagle et Ives, 2002 & Ovidio et al., 2017 & Fjelstad et al., 2012 & Scruton et al., 2007 & 2008). Cependant, en fin de dévalaison, les smolts peuvent migrer aussi bien le jour que la nuit (Moore et al., 1995 & Ibbotson et al., 2006). Il apparaît que la dévalaison est généralement active (Davidsen et al., 2005 & Thorstad et al., 2012 &

Martin et al., 2012) en combinaison avec une nage plus passive lorsque le débit est élevé (Thorstad et al., 2012). Jonsson (1991) suggère que les smolts réalisent une nage active afin d'éviter les obstacles ou de trouver les endroits où la vitesse de courant est plus élevée. Les smolts suivent en général le courant principal (Brevé et al., 2014 & Scruton et al., 2007) et nagent à la surface (Scruton et al., 2003 & Coutant et Whitney, 2000). Ils ont tendance à se rassembler en bancs pour dévaler (McCormick et al., 1998 & Riley, 2007).

Le timing migratoire est crucial pour la survie du smolt (Hansen, 1987). La dévalaison se déroule lors d'une période précise qui est la «smolt migration window», période pendant laquelle les conditions environnementales sont idéales pour la dévalaison. Pendant cette période, généralement au printemps, l'état physiologique du smolt est optimal pour supporter l'augmentation de la salinité. Toutes perturbations environnementales telles qu'une température trop élevée, des obstacles ou la prédation, pourraient engendrer un décalage entre la migration et la « smolt migration window » et être fatal (McCormick et al., 1998 & Marschall et al., 2011).

L'initiation et le pattern de la dévalaison sont modulés par plusieurs facteurs environnementaux (McCormick et al., 1998).

La photopériode, dont la variation est constante d'une année à l'autre, joue le rôle principal de compléter le processus de smoltification en augmentant la sensibilité des smolts à d'autres facteurs tels que la température et la vitesse de courant (McCormick et al., 1998). De plus, elle influence le rythme de la migration en déterminant la période pendant laquelle la dévalaison est possible (Martin et al., 2012). En effet, une augmentation de la photopériode après l'hiver stimule l'initiation de la migration (Zydlowski, Stich et McCormick, 2014).

La température influence à la fois la smoltification et le déclenchement de la dévalaison (Fry, 1971 & Jonsson, 1985). En fonction de la latitude, la température nécessaire pour amorcer la dévalaison varie entre 5°C et 15°C (McCormick et al., 1998 & Whalen, Parrish et McCormick, 1999 & Dolotov, 2006 & Otero et al., 2014 & Martin et al., 2012). Une élévation rapide de la température peut initier une dévalaison précoce et accélérer la vitesse de migration (Martin et al., 2012 & Thorstad et al., 2017).

Le pattern de migration dépend également du **débit de l'eau** (Stich et al., 2015 & Havn et al., 2017). En général, les smolts sont davantage stimulés à dévaler quand le débit est plus élevé en combinant nage active et passive (Thorstad et al., 2012 & 2017). Une accélération de la vitesse du courant stimule l'initiation de la dévalaison et permet aux smolts de s'orienter (Thorstad et al., 2012).

1.3.2. Perturbation de la dévalaison par l'anthropisation des rivières

Il est important de considérer l'impact des activités anthropiques sur le succès de la dévalaison chez le saumon. En effet, un taux d'échappement bas (pourcentage d'individus qui arrivent jusqu'à la mer) va automatiquement entraîner une réduction considérable du nombre de saumons adultes revenant se reproduire en rivière (Thorstad et al., 2017). Lors de leur dévalaison, les smolts sont sujets à plusieurs contraintes anthropiques.

La canalisation des cours d'eau: les canaux de navigation perturbent l'hydrologie naturelle des cours d'eau (Philippart et al., 2008) et peuvent causer une désorientation et un épuisement chez les smolts (Dierckx et al., 2017). Ce phénomène est notamment observable en Wallonie pour le canal Albert dans lequel une partie des smolts sont entraînés au détriment du cours naturel de la Meuse (Ovidio et al., 2015 & 2016 & Dierckx et al., 2017).

La qualité physico-chimique de l'eau: une altération de la qualité physico-chimique de l'eau altère le développement des smolts (McCormick et al., 1998) et augmente le risque de mortalité (Larinier et Travade, 2002). De plus, une augmentation artificielle de la température de l'eau a pour conséquence de restreindre la « smolt migration window » et d'arrêter la dévalaison suite à la perte de leurs capacités à supporter l'eau de mer dû à une désmoltification (McCormick et al., 1998 & McCormick et Saunders, 1987 & Diercks et al., 2017). Ce phénomène augmente le taux de mortalité (Thorstad et al., 2017 et Lawrence et al., 2016 & Marschall et al., 2011). Par exemple, la différence de température entre l'Ourthe et la Meuse peut atteindre plus de 5°C et peut causer des problèmes de désmoltification.

Les ouvrages hydro-électriques : en amont d'un barrage, le smolt va rechercher une voie de passage afin de poursuivre sa dévalaison, ce qui cause une augmentation de ses dépenses énergétiques (Svendsen et al., 2011 & Diercks et al., 2017 & Marschall et al., 2011). Une perte d'énergie augmente le risque pour les smolts de se faire entraîner vers les turbines ou les déversoirs (Scruton et al., 2007 & 2008 & Philippart et al., 2016). De plus, suivant le type de turbine et de déversoir, le risque d'être blessés ou tués (Coutant et Whitney, 2000 & Larinier et Travade, 2002) varie en fonction :

- de la hauteur de la chute et l'intensité des turbulences au niveau des déversoirs
- du modèle de la turbine, de la vitesse de rotation, la hauteur de la chute, du nombre de pales et leur espacement. Les turbines Kaplan et Francis, dont le taux de mortalité respectif peut atteindre 20% et 90%, sont les plus fréquentes (Larinier et Travade, 1998 & 2002 & Larinier, 2008 & Fu et al., 2016).

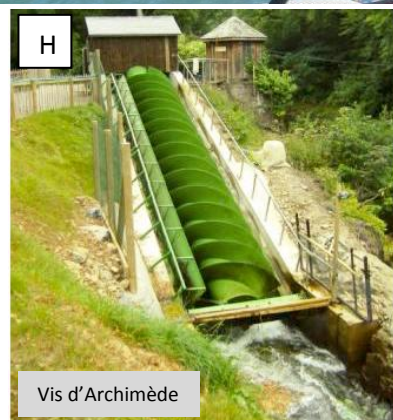
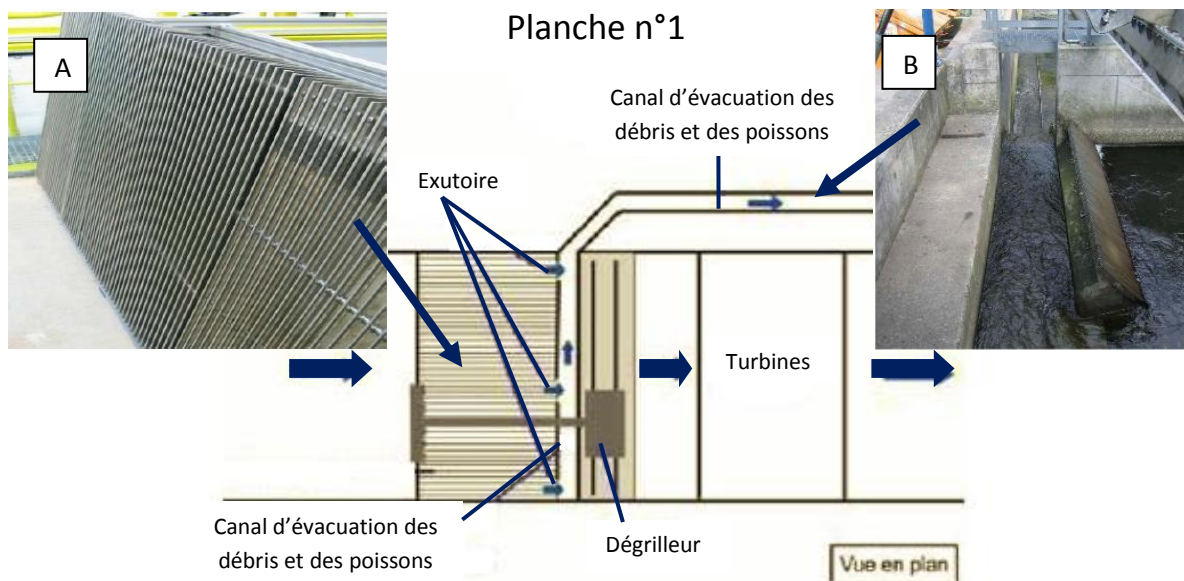
Les smolts entraînés par ces voies peuvent être soumis à un grand nombre de risques (Trumbo et al., 2014 & Brown et al., 2012 & Fu et al., 2016). Ils peuvent subir des blessures, voire être victimes de mortalité directe ou indirecte (Brevé et al., 2014 & Larinier et Travade, 2002). Une réduction rapide de la pression peut induire un barotraumatisme, associé à la rupture de la vessie natatoire. La libération de bulles de gaz dans le milieu environnant peut

causer une exophtalmie, une hémorragie ou une embolie. Les smolts subissent également des cisaillements et fractures, des dommages au niveau des organes, un broyage ou des abrasions (Larinier et Travade, 2002). Après le passage par les turbines, les smolts sont soit morts, blessés, stressés ou désorientés (Stich, Bailey et Zydlewski, 2014 & Haro et al., 1998 & McCormick et al., 1998). De plus, ils peuvent exprimer des comportements anormaux, tels qu'une nage affaiblie ou une perte d'équilibre (Coutant et Whitney, 2000).

L'amont (Haro et al., 1998 & Coutant & Whitney 2000 & Larinier et Travade, 2002) et l'aval (Brevé et al., 2014 & Serrano et al., 2009 & Koed et al., 2002) des barrages hydro-électriques constituent dès lors un endroit de chasse idéal pour les prédateurs piscicoles et avicoles entraînant un stress ou un risque supplémentaire de mortalité chez les smolts (Järvi, 1989). Ces contraintes retardent la dévalaison (Nygqvist et al., 2016 & Mills, 1989 & Havn et al., 2018). Une centrale hydro-électrique isolée peut ne pas avoir d'impact significatif sur le timing de la migration (Coutant et Whitney, 2000 & Scruton et al., 2008). Cependant, l'impact cumulé de l'ensemble des obstacles rencontrés peut induire un retard considérable (Nygqvist et al., 2016 & Coutant et Whitney 2000 & Monnerjahn, 2011 & Steinbach et al., 2001) avec un décalage par rapport à la « smolt migration window » (Marschall et al., 2011). La conséquence est une désmoltification précoce avec la perte des capacités à supporter le passage en eau de mer (McCormick et al., 1998 & McCormick et Saunders, 1987).

1.3.3. Moyens mis en œuvre pour faciliter la dévalaison

La mise en place de voies alternatives et de systèmes de guidance telles que les barrières physiques et comportementales permettent d'atténuer les effets néfastes des barrages hydro-électriques sur la dévalaison (Coutant et Whitney 2000 & Larinier, 2008) et améliorent le franchissement des ouvrages (Svendsen et al., 2011) en guidant les poissons pour qu'ils évitent les turbines (Coutant et Whitney 2000 & Thorstad et al., 2012 & Philippart et al., 2008 & Larinier, 2008). L'efficacité d'une voie de passage alternative ou d'un système de guidance dépend de l'espèce ciblée (Calles et al., 2012), de ses caractéristiques physiques et comportementales (Larinier et Gosset, 1994), de la période de l'année (Ovidio et al., 2017) et des caractéristiques typologiques du site concerné (Scruton et al., 2003). Des grilles inclinées en amont des turbines, par exemple (Planche n°1 : A), constituent une des barrières physiques les plus fréquentes et sont souvent associées à un exutoire de dévalaison (Planche n°1 : B). Ce dispositif s'avère être efficace pour guider des poissons vers la voie alternative. Son efficacité dépend de la forme et de l'inclinaison de la grille (inférieure à 25°C par rapport à l'horizontale), de l'espacement des barreaux (inférieur à 25mm), de la vitesse de courant (inférieure à 0,5m/s) (Larinier et Gosset, 1994 & Larinier et Travade, 1998 & Katopodis et Williams, 2012 & Tomanova, Courret et Alric, 2017).



Illustrations des dispositifs mis en place pour favoriser la dévalaison des smolts de saumons atlantiques (Travade et Larinier, 1992 – Burgun, 2014)

Ces barrières peuvent être associées à des barrières comportementales telles qu'un rideau de bulles, de lumière, de sons ou un champ électrique (Planche n°1 : C&E&F). Contrairement aux barrières physiques, elles sont peu efficaces seules (Travade et Larinier, 1992 & Larinier et Travade, 1998). Le Floating louver, une série de lattes verticales posées dans la colonne d'eau, allie à la fois un effet physique et comportemental. Il a montré une certaine efficacité pour repousser et guider les espèces migratrices vers une voie alternative (Hocutt et Edinger, 1980 & Scruton et al., 2003) (Planche n°1 : D).

Pour le saumon atlantique, un exutoire est plus efficace la nuit (Scruton et al., 2003 & Fjelstad et al., 2014) et lorsqu'il présente un débit de fonctionnement élevé (Fjelstad et al., 2012 & Scruton et al., 2008 & Nyqvist et al., 2016 & Thorstad et al., 2017), une absence de turbulence, une vitesse de courant supérieure à la vitesse de nage des saumons et une accélération uniforme de l'eau avec une vitesse dans le by-pass 1,4 fois supérieure à la vitesse d'approche (Travade and Larinier, 1992). De plus, la présence d'une lampe à mercure à l'entrée de l'exutoire pendant la nuit (Fjelstad et al., 2012 & Ovidio et al., 2017) et d'un floating louver (Hocutt et Edinger 1980 & Ruggles et al., 1993) à l'entrée du by-pass améliore son attractivité.

Pour des nouveaux sites de production, l'installation de turbines « fish friendly », comme la vis d'Archimède, les turbines VLH et ALDEN, peut être envisagée (Planche n°1 : G&H). Leur morphologie, l'espace important entre les pales, leur faible vitesse de rotation et l'absence de variations brutales de pression et de vitesse sont conçus de manière à ne pas blesser ni tuer les poissons (Cefas, 2012 & Ecogea, 2010).

Une fois les dispositifs installés, il est nécessaire de réaliser des observations pour déterminer leur attractivité et leur efficacité. Suivant les installations, des études de mortalité ou des études sur le comportement de dévalaison des poissons qui rencontrent les dispositifs en question sont effectués.

1.4. Comportement des smolts en amont d'un obstacle anthropique

En arrivant en amont d'un barrage, le comportement des smolts dépend de leur personnalité, de leur vécu et de leur état de smoltification (Coutant et Whitney, 2000 & Fjelstad et al., 2012) mais surtout de la configuration du site. Les smolts, capables de ressentir la vitesse du courant, se positionnent en rhéotaxie positive lorsqu'ils perçoivent une accélération du courant et une augmentation des turbulences au niveau d'un barrage. Il est utile que la vitesse du courant à l'entrée d'un by-pass soit plus importante que la capacité de nage du smolt pour qu'il ne soit plus capable d'y résister (Haro et al., 1998 & Ovidio et al., 2017). Quand la vélocité est très faible, il arrive que les smolts pénètrent dans le by-pass la tête la première (Vowles et al., 2014). La répartition des débits entre les différentes voies potentielles influence la vitesse de franchissement du barrage (Castro-

Santos et Perry, 2012) et impacte fortement le choix de la voie de passage (Serrano et al., 2009 et Thorstad et al., 2017 & Fjelstad et al., 2012). Etant donné le débit de la prise pour les turbines souvent plus important que celui restant pour le tracé naturel de la rivière, lors de la dévalaison, la plupart des smolts auront tendance à être attirés vers les turbines lors de la dévalaison. Le défi est de mettre au point des systèmes efficaces pour éviter cette attraction vers la mauvaise voie, en fonction de la typologie des sites de production.

Les études de dévalaison des smolts se focalisent principalement sur l'impact des centrales hydro-électriques (Brevé et al., 2014 & Stich et al., 2014) et l'efficacité de voies de passage alternatives mises en place (Fjelstad et al., 2014 & Thorstad et al., 2017 & Tomanova et al., 2017). Le comportement fin de recherche en amont d'un barrage, idéal pour étudier l'attractivité des voies de passage, reste moins connu (Svendsen et al., 2011 & Nyqvist et al., 2016). Ces études sont souvent effectuées à l'aide de la radio-télémétrie (Scruton et al., 2008 & Thorstad et al., 2017 & Havn et al., 2018). En Wallonie, le peu d'études comportementales ont été réalisées principalement à partir de la technique RFID et de la télémétrie acoustique (Benitez et al., 2015 & 2016 & Ovidio et al., 2015). Sur le site de Méry, seule une étude a été effectuée en 2008 à l'aide de la radio-télémétrie (Philippart et al., 2008). L'idéal est de réaliser des études qui combinent la mise en évidence du comportement en amont de l'ouvrage et la quantification du choix des voies de passage.

1.5. Objectifs de l'étude

Ce travail s'intègre dans le cadre du projet saumon Meuse financé par le service public de Wallonie DGARNE – DNF. L'objectif général du mémoire est d'améliorer nos connaissances sur les comportements fins de recherche de voies de passage pour des smolts de saumons atlantiques en phase de dévalaison vers la mer. Nous avons sélectionné un site d'étude particulièrement intéressant, le barrage hydro-électrique de Méry, de par sa configuration (plusieurs voies de passages potentielles, deux types de turbines, un exutoire de dévalaison, une échelle à poisson) et sa position dans l'axe migratoire (la basse Ourthe juste avant la confluence avec la Meuse). Des méthodes de télémétrie radio et RFID seront utilisées pour : (1) déterminer finement le comportement de recherche d'une voie de passage ; (2) identifier les voies de passage préférentielles des smolts avec la mise en évidence du pourcentage d'utilisation de chaque voie ; (3) déterminer la durée nécessaire aux smolts pour franchir le site de Méry ; (4) analyser les patrons de mobilités des smolts après le passage du barrage de Méry et (5) poursuivre en 2018 le monitoring historique du piège de l'exutoire de dévalaison de Méry afin de préciser les facteurs environnementaux déclencheurs de la migration.

2. Matériels et méthodes

2.1. Bassin de la Meuse

La Meuse prend sa source en France, en Bourgogne à 402m d'altitude et traverse la Belgique et les Pays-Bas avant de se jeter en Mer du Nord. Le cours d'eau est long de 925km dont 194km s'étendent en Belgique (Fig. 5). Les affluents de la Meuse reprennent notamment en Belgique la Sambre, la Meuse, la Lesse et l'Ourthe. L'Ourthe, un cours d'eau belge long de 235km, prend sa source à deux endroits situés à 500m d'altitude en Ardennes pour former l'Ourthe Orientale (dans la commune de Gouvy) et l'Ourthe Occidentale (la commune de Libramont-Chevigny). Le débit moyen annuel de l'Ourthe Orientale est de $2,18\text{m}^3/\text{s}$ (Station Limnométrique L6550 de Brizy et Station Limnométrique L5930 d'Houffalize-Aqualim du Service Public de Wallonie) et l'Ourthe Occidentale de $3,79\text{m}^3/\text{s}$ (Station L6290 d'Amberloup et Station L5950 de Wyompont-Aqualim). Ces deux bras confluent à proximité du village d'Engreux. L'Ourthe, dont la superficie du bassin versant est de 1844km^2 s'étend à la fois sur la province du Luxembourg, de Namur et de Liège. Les principaux affluents sont l'Aisne, la Lembrée, le Néblon, l'Amblève et la Vesdre. L'Ourthe, divisée en 2 parties, comprend la Haute Ourthe et la Basse Ourthe. La Basse Ourthe, longue de 82km, débute dans la province du Luxembourg et conflue avec la Meuse à Liège à 60m d'altitude. À hauteur de la station de Sauheid, le débit moyen de la basse Ourthe est de $37,64\text{m}^3/\text{s}$ et celui au niveau de la confluence avec la Meuse de $55,2\text{m}^3/\text{s}$.



Figure 5: Représentation de la Meuse (bleu), de l'Ourthe (orange) et du site de la centrale hydro-électrique de Méry (rouge) (www.ardenne.org)

L'Ourthe représente un cours d'eau de bonne à très bonne qualité, idéal dans le cadre d'un programme de réintroduction du saumon atlantique (Philippart et al., 2010 et

2017). Les Ourthe Orientale et Occidentale sont considérées comme étant une zone à ombres. La Basse Ourthe est définie quant à elle comme une zone à barbeaux suivie d'une zone à brèmes. On y retrouve une multitude d'espèces piscicoles avec une dominance pour les cyprinidés comme notamment le barbeau (*Barbus barbus*), le chevine (*Squalius cephalus*) et le gardon (*Rutilus rutilus*). Les Salmonidae tels que le saumon atlantique (*Salmo salar*) y sont également présents grâce à des programmes de reproduction.

Tout au long de l'Ourthe, de nombreux barrages sont répertoriés. Au niveau de la Basse Ourthe, on dénombre 11 obstacles qui entravent la libre circulation des poissons dont 6 sont situés à moins de 13km de la confluence avec la Meuse. On y retrouve, de l'amont vers l'aval, le Barrage de Méry, de Tilff, de Colonster, de Campana, de Streupas et celui des Grosses Battes (Fig. 6 & Tab. 1).

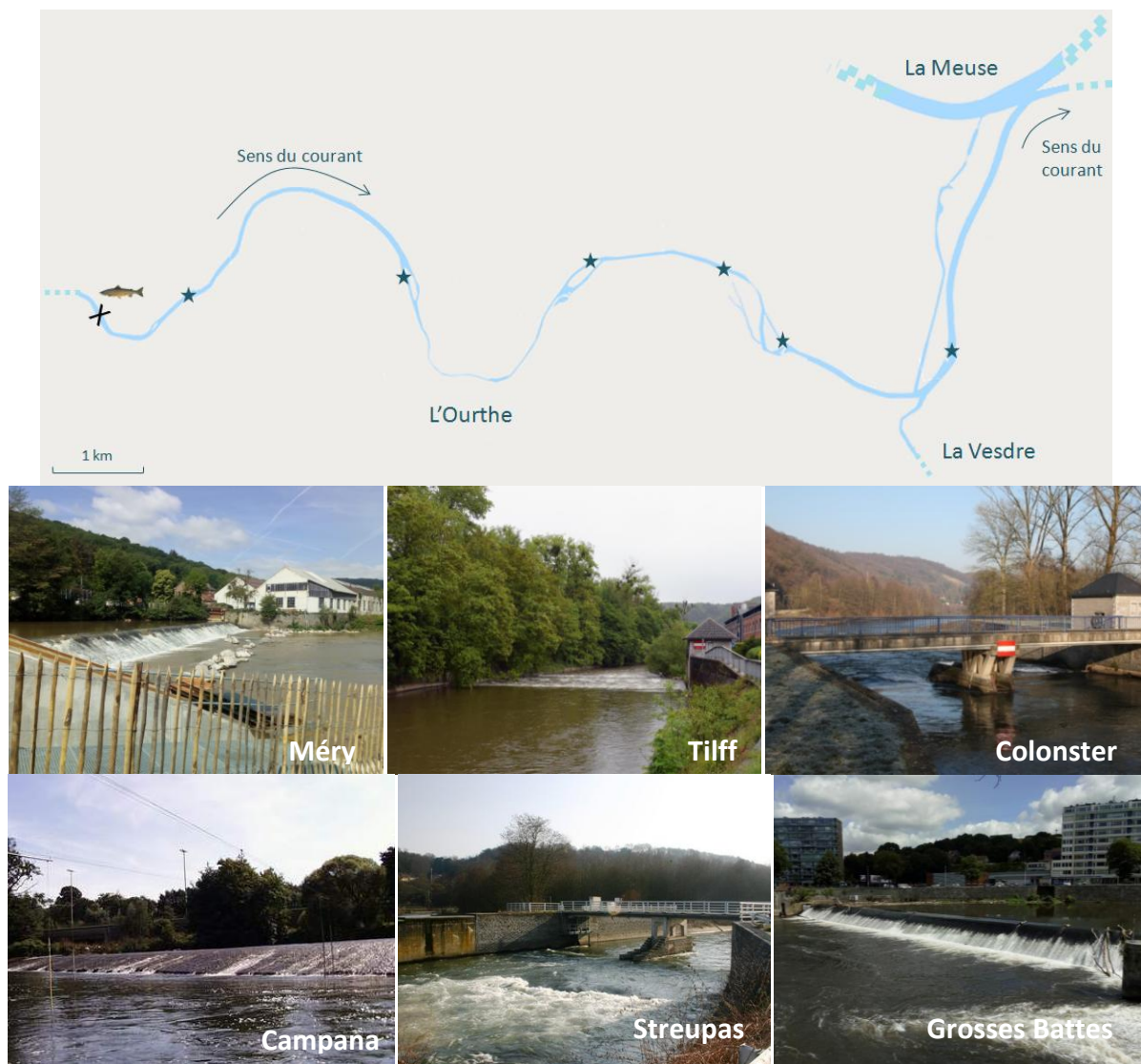


Figure 6: Tronçon de la basse Ourthe reprenant 6 barrages, en amont de la confluence avec la Meuse.

★ les 6 barrages d'intérêt de cette étude : Méry-Tilff-Colonster-Campana-Streupas-Grosses Battes.

X Point de déversement des smolts.

	Méry	Tilff	Colonster	Campana	Streupas	Grosses Battes
Distance de la confluence (km)	12,7	9,56	6,03	5,03	4,1	2,3
Type de barrage	Barrage rampe	Barrage mobile	Barrage rampe	Barrage rampe	Barrage mobile	Barrage rampe & vanne
Largeur du site (m)	100	27	26	128	25	85
Hauteur de la chute d'eau (m)	1,8	/	0,50	/	/	4

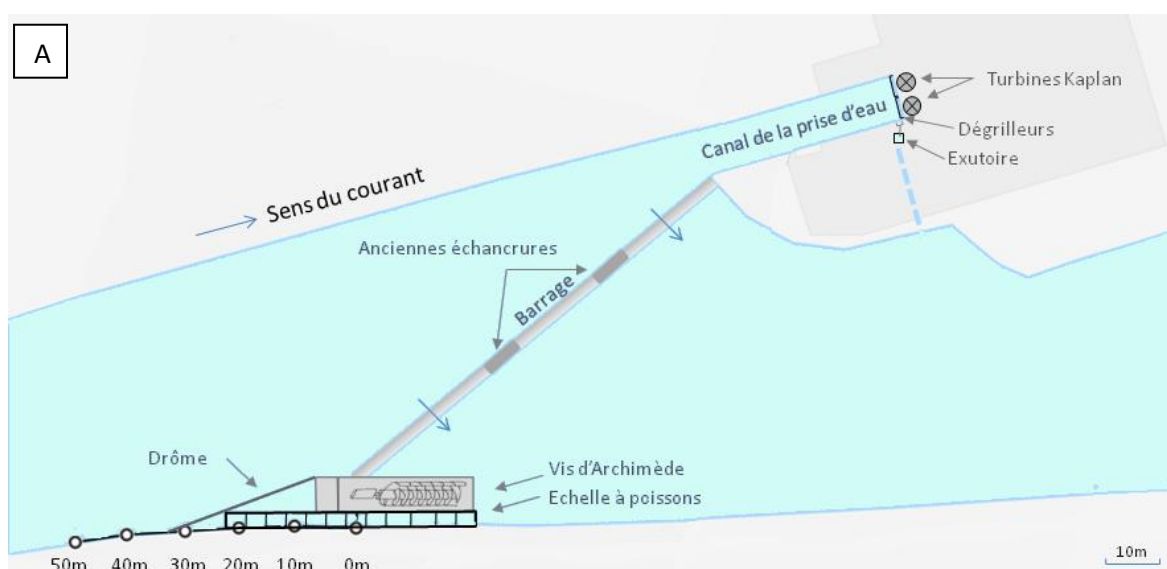
Tableau 1 : Caractéristiques des 6 barrages présents en basse Ourthe en amont de la confluence avec la Meuse

2.1.1. Barrage de Méry

Le barrage de Méry est l'un des neuf plus anciens barrages de navigation de la basse Ourthe (Philippart et al., 2010). La centrale hydro-électrique Mérytherm est une centrale au fil de l'eau produisant de l'énergie par dérivation d'une fraction du débit de la rivière. Une fois utilisée, l'eau est ensuite restituée au cours d'eau, 400m en aval de la centrale. La production annuelle varie donc en fonction des conditions climatiques. L'eau prélevée par les 2 turbines Kaplan a un débit maximal de 10 m³/s. La micro-centrale produit en moyenne 1.200.000 kWh sur 8000 heures de turbinage par an (Philippart et al., 2008 et 2010). Depuis 2018, une troisième turbine « fish friendly » de type vis d'Archimède est opérationnelle, dont la vitesse de rotation est de 60 tours/min et dont la puissance est de 99 kWh. Dans sa configuration actuelle, la centrale hydro-électrique offre cinq voies de passage potentielles pour les smolts en dévalaison (Fig. 7A).

1. **Les turbines Kaplan.** Un canal d'amenée redirige une partie de l'eau vers les deux turbines Kaplan avec une vitesse maximale de 0,8m/s (Fig. 7B). Les turbines mesurent 1,80m de diamètre et ont une vitesse de rotation de 250 tours/minute. En amont des turbines est installée une grille inclinée, de 10m large et de 3m de haut. Elle permet grâce à un système de nettoyage, d'évacuer les déchets mais également de guider les poissons vers l'exutoire de dévalaison et de leurs éviter d'être en contact avec les turbines et de subir des dommages. Les barreaux sont espacés de 5cm. Certains poissons ne sont pas retenus par la grille et peuvent passer entre les barreaux et traverser les turbines. Pour ce type de turbines Kaplan, le taux de mortalité théorique peut atteindre 20% (Larinier et Travade, 2002 & Fu et al., 2016 & Philippart et al., 2008).
2. **L'exutoire.** Cette voie représente un passage de contournement des turbines installé par le SPW en 2007 (Fig. 7C). Le débit à l'entrée de l'exutoire est de 0,25m³/s. Les poissons qui empruntent l'exutoire sont entraînés sur une grille inclinée de 15% et sont réceptionnés dans un vivier pour un monitoring. Le piège mesure 1m de long, 0,8m de large et 0,8m de haut (Fig. 7D). Afin d'augmenter l'attractivité de l'exutoire, une lampe à mercure a été installée à l'entrée (Philippart et al., 2008 & 2010).

3. **Le barrage**, long d'une centaine de mètres et un dénivelé maximal de la chute d'eau d'environ 1,8 m, représente la troisième voie lorsque le débit est élevé (Fig. 7E). Les deux anciennes échancrures ont été rebouchées afin d'augmenter le débit de la prise d'eau pour les turbines Kaplan et la vis d'Archimède. Une nouvelle échancrure a été installée à côté de la vis d'Archimède et mesure 40cm de haut et 52cm de large (Fig. 7F).
4. **La vis d'Archimède**. Cette turbine « fish friendly » mesure 25m de long et a une vitesse de rotation de 60tours/minute. Une drome a été installée en amont de la turbine pour rediriger les déchets vers le déversoir. Une partie de la drome est immergée, jusqu'à 30cm de profondeur (Fig. 7G).
5. **L'échelle à poissons**, mise en place en 2018, mesure 45m de long et comprend 12 bassins. Elle facilite la montaison des poissons mais il est possible aussi que les smolts l'empruntent pour dévaler (Fig. 7H).



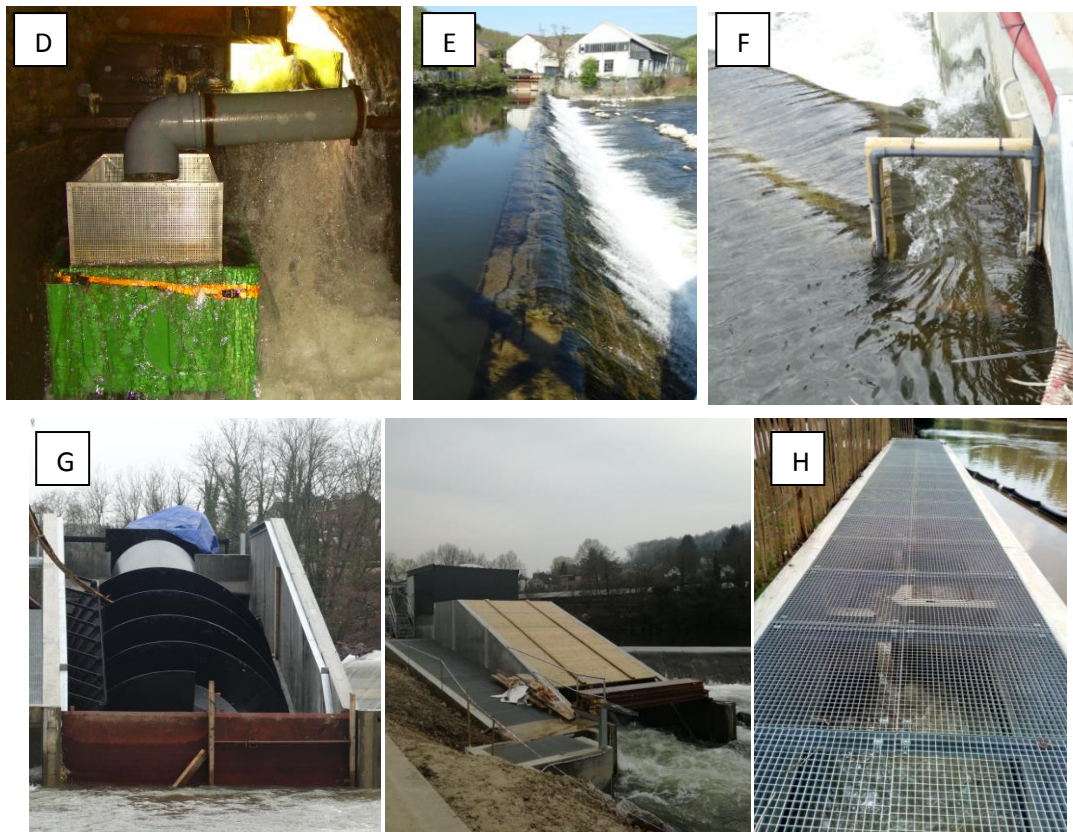


Figure 7: Illustration du site de Méry sur l'Ourthe et de ses voies de passage potentielles

2.2. Acquisition des données

Les smolts de saumon atlantique utilisés pour l'étude proviennent de la pisciculture d'Erezée et sont âgés de 1 an. Les $n = 217$ smolts mesuraient entre 143 et 196mm et pesaient entre 31 et 84g (Tab 2 & 3).

2.2.1. Marquage des poissons

2.2.1.1. Emetteurs radios

Des smolts ($n=17$) ont été munis d'un émetteur radio ATS (série R1400 ; Model F1410) (Tab. 2) qui est recouvert d'une résine biocompatible pour assurer son étanchéité. Pour ne pas affecter leur chance de survie et les capacités de nage des poissons, la marque ne doit idéalement pas dépasser 2% du poids du poisson (Ovidio & Philippart, 2002). Les émetteurs, sélectionnés pour l'étude, pèsent 1g et mesurent 15mm (Fig. 8) et ont une durée de vie théorique de 20 jours. Une implantation chirurgicale interne a été préférentiellement choisie afin de diminuer les risques d'effets sur le comportement des smolts mais également pour éviter les pertes de matériel. Pour ce faire, les smolts ont été anesthésiés au préalable à l'aide de 0,3ml/l de Phénoxy-éthanol. Ensuite, une incision de 5-6 mm a été réalisée entre la nageoire pelvienne et l'anale afin d'insérer l'émetteur dans la cavité intra-péritonéale

(Ovidio et al., 2017). Une fois que celui-ci est implanté, l'incision a été recousue de deux points de suture et a été désinfectée à l'aide d'éosine. Les smolts sont placés environ 1h dans des bassins en eau de rivière pour récupérer avant d'être relâchés.



Figure 8: Représentation d'un émetteur radio

Smolts	Lot	Taille (mm)	Poids (gr)	Rapport poids/émetteur
1	1	170	52	1,97
2	1	163	47	2,13
3	1	167	50	2
4	1	168	50	2
5	2	169	51	1,96
6	2	171	54	1,85
7	2	173	54	1,85
8	2	169	52	1,92
9	3	157	40	2,5
10	3	196	83	1,21
11	3	174	63	1,59
12	3	184	65	1,54
13	3	174	36	2,78
14	4	185	61	1,64
15	4	185	70	1,48
16	4	184	69	1,45
17	4	185	75	1,33

Tableau 2: Caractéristiques des smolts de saumon atlantique équipés d'un émetteur radio

2.2.1.2. Marques RFID

Des smolts (n=200) ont été munis d'une marque RFID de 23mm et de 0,8g (Transpondeur TIRIS Texas Instrument) insérée dans la cavité intra-péritonéale (Fig. 9 & Tab. 3) via une incision de 5mm. Contrairement aux émetteurs radio, ce type marquage ne nécessite pas de suture (Ovidio et al., 2017). Après marquage, les smolts ont été placés 1h dans des bassins en eau de rivière pour récupérer.

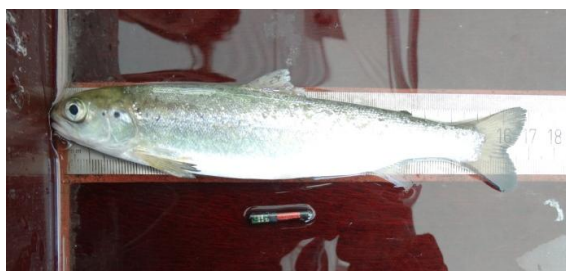


Figure 9: Représentation d'une marque RFID

Lot	Taille (mm)			Poids (gr)			Rapport poids/émetteur
	(Min)	(Moyenne)	(Max)	(Min)	(Moyenne)	(Max)	
1 (n= 50)	143	155,62	173	33	42,38	55	1,89
2 (n= 50)	143	157,42	172	31	41,04	54	1,95
3 (n= 50)	141	160,5	184	30	44,06	63	1,82
4 (n= 50)	157	176,78	191	35	58,94	84	1,36

Tableau 3: Caractéristiques des smolts de saumon atlantique équipés d'une marque RFID

2.2.2. Déversement des poissons

Les smolts, répartis en quatre groupes, ont été déversés à environ 1200 m en amont du barrage de Méry à 4 périodes différentes afin de les étudier dans des conditions environnementales variables (Tab. 4). Les dates de déversements ont été décidées principalement en fonction du débit et de la température de la rivière afin de déterminer leur influence sur le comportement de dévalaison des smolts.

Lot	Date	Heure	N = Radio/R FID	Débit (m ³ /s)	Température (°C)	[O ₂] (mg/l)	Saturation (%)	Hauteur d'eau (cm)
1	9-04-18	21 :00	4-50	37,2	12,15	13,9	143	26
2	19-04-18	18 :30	4-50	24,1	16,2	13,2	135	20
3	26-04-18	15 :45	5-50	18	14	12,2	119	13
4	17-04-18	16 :15	4-50	20,1	17,6	9,5	100,3	14

Tableau 4: Conditions environnementales et hydrauliques à Méry lors de chaque déversement.

Remarque : Au 3^{ème} déversement, 5 smolts ont été exceptionnellement marqués d'un émetteur radio.

2.2.3. Suivi des smolts par la technique de télémétrie radio

La télémétrie radio est une technique efficace pour étudier le comportement individuel des poissons, leurs déplacements en amont d'un obstacle ou encore pour déterminer l'efficacité de by-pass (Scruton et al., 2002). Les smolts munis d'un émetteur sont distinguables individuellement car chaque émetteur émet des signaux en continu sur une fréquence différente dans les 49 MHz. Grâce aux antennes, les récepteurs (ATS Fielmaster) interceptent les ondes émises et les transforment en signaux audibles pour l'opérateur.

Avec la participation de 5 opérateurs, le suivi s'est déroulé du point de déversement en amont du barrage de Méry jusqu'au point le plus en aval possible (Fig. 7). En général, lorsque les smolts se positionnaient en amont de la centrale de Méry, 2 à 3 opérateurs s'aidaient afin de relever les positions des différents individus. Une fois le barrage franchi, les opérateurs se séparaient pour suivre chacun un individu en particulier. Les smolts ont été pistés manuellement et en continu jusqu'à 7h post-déversement. Les 2 jours suivant les déversements, des localisations ont été effectuées deux fois par jour, le matin et le soir par deux opérateurs. Les recherches ont été réalisées à l'aide d'antennes directionnelles ou d'antennes fixées sur le toit des voitures. Les antennes de toit détectent un signal à moins de 100m et permettent de s'approcher plus rapidement de la source d'émissions lors d'un grand déplacement mais ne permettent pas un pointage précis. Une fois la source retrouvée, les antennes directionnelles, utiles lorsque le smolt se trouve à moins de 50m, permettent de s'approcher du signal et d'obtenir des positions précises des smolts grâce à la technique de bi-angulation. Pour chaque position, 2 points séparés par un angle de 90° ont été relevés (Fig. 10) (Mech and Barber, 2002). Ce type de localisation a permis de déterminer le comportement fin de recherche des smolts en amont du barrage de Méry. La précision varie de l'ordre de 1 à 3m² en fonction de la distance entre des points de bi-angulation utilisés et la position du smolt.

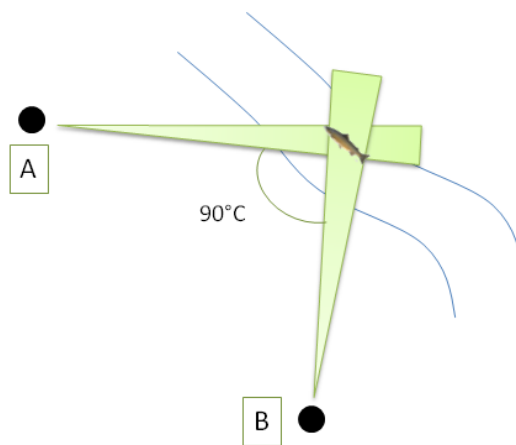


Figure 10: Représentation de la technique de bi-angulation utilisé en radio-télémétrie manuelle avec mise en évidence de l'aire d'incertitude de localisation

2.2.4. Suivi des smolts par la méthode RFID

Le suivi des smolts par la méthode RFID est complémentaire à la télémétrie radio. Elle permet d'obtenir davantage de données sur le comportement des smolts telles que les voies de passage préférentiellement choisies. Ce type de suivi a été utilisé uniquement en amont du barrage de Méry à partir de deux antennes fixes, l'une placée à l'entrée de la vis d'Archimède et l'autre à la nouvelle échancrure (Fig. 12). Les antennes de détection RFID sont branchées à des stations en écoute permanente et enregistrent automatiquement la

marque ainsi que l'heure de passage du smolt lorsqu'un poisson passe à proximité de l'antenne. Les différents points de détection sont :

- Vis d'Archimède : l'antenne (4m de long sur 1m de large) est installée en amont de la turbine et est entièrement immergée. Elle enregistre tous les smolts à moins de 20 cm qui s'approchent de la vis d'Archimède (Fig. 11A).
- L'échancrure proche de la vis d'Archimède de Méry : l'antenne (70cm de long sur 45cm de large) est disposée sur tout le pourtour du déversoir. Elle détecte les smolts qui s'en approchent à moins de 30 cm et qui le franchissent (Fig. 11B).



Figure 11: Illustrations des antennes RFID installées en amont de deux voies de passage du barrage de Méry. A) Antenne en amont de la vis d'Archimède – B) Antenne au niveau de la nouvelle échancrure.

De plus, même si aucune antenne n'y a été installée, le piège associé à l'exutoire de dévalaison a permis de récupérer une partie des smolts RFID-marqués et d'augmenter le nombre de données via l'utilisation d'un lecteur manuel. Les smolts capturés dans l'exutoire ont été scannés pour obtenir le code RFID puis ont été relâchés en aval du barrage.

2.3. Analyses comportementales

Pour analyser le comportement des smolts à leur arrivée au barrage de Méry, lors du franchissement et lors de leur progression en aval, nous avons défini plusieurs métriques quantitatives

- Etude de l'attractivité et de l'efficacité de chaque voie de passage au niveau du barrage de Méry
 1. **Mise en évidence des zones de concentration** : ces zones ont été délimitées en localisant et en comptabilisant le nombre de smolts en amont du barrage de Méry pour chaque session de déversement (sur base des suivis radio). Pour avoir une vue plus globale, certaines sessions ont été rassemblées suivant le débit.
 2. **Utilisation des voies de passage** : le nombre de smolts qui passent par chaque voie par rapport au nombre total de smolts déversés (en pourcent) (sur base des suivis radio et RFID).

3. Efficacité de l'exutoire de dévalaison (sur base des suivis radio et RFID) :
 - **Efficacité globale** : le nombre de smolts qui empruntent l'exutoire par rapport au nombre total de smolts déversés (en pourcent).
 - **Efficacité corrigée** : le nombre de smolts qui sont passés par l'exutoire par rapport au nombre de smolts qui se sont approchés de l'entrée (en pourcent) (Ovidio et al., 2017).
4. **Délai de franchissement associé à chaque voie de passage** : le temps (en heure) associé à chaque voie de passage, nécessaire pour franchir le barrage de Méry (sur base des suivis radio)
- **Patrons de mobilités des smolts** tout au long de l'Ourthe
 1. **Vitesse de progression des smolts** :
 - la vitesse moyenne globale (m/s) calculée entre le point de déversement et la dernière localisation la plus en aval (sur base des suivis radio).
 - la vitesse moyenne (m/s) des smolts dans les biefs entre chaque barrage calculée sur base du moment où le smolt franchit un barrage et le moment où il atteint le barrage suivant (sur base des suivis radio).
 2. **Délai de franchissement des barrages** : le temps (en heure) nécessaire pour franchir chaque barrage calculé entre le moment où le smolt arrive à moins de 20 m du barrage et le moment où il parvient à le franchir (sur base des suivis radio).

2.4. Monitoring du piège à la dévalaison

Le piégeage est une étude complémentaire aux suivis des smolts permettant de fournir des données supplémentaires sur la dévalaison et sur les facteurs environnementaux qui l'influencent. Le piège a été utilisé lors des quatre sessions de suivi pour récupérer des smolts marqués, mais le piège est contrôlé durant toutes les saisons de migrations depuis 2007, et nous avons contribué à la poursuite historique de ce monitoring. Le piégeage s'est déroulé au niveau de l'exutoire du 16 mars au 30 mai 2018 à raison de 3 fois par semaine (généralement lundi, mercredi et vendredi). Chaque smolt de saumon atlantique récupéré dans le piège est mesuré et pesé avant d'être relâché dans la rivière.

2.5. Analyses des données et tests statistiques

Plusieurs analyses de données ont été effectuées et complémentées par des analyses statistiques réalisées à l'aide du logiciel R version 2.15. Etant donné le faible effectif, seuls des tests statistiques non-paramétriques ont été utilisés.

1. Analyse du **comportement fin de recherche** des smolts en amont de l'ouvrage hydro-électrique de Méry

2. Comparaison des **zones de concentration des smolts** obtenues entre les différents déversements à l'aide de cartes. Etant donné les conditions de débit et de température de l'eau assez proches, les 4 lots ont été rassemblés en 2 groupes ; le 1^{er} groupe reprenant les 1^{er} et 2^{ème} lots et le 2^{ème} groupe, les 3^{ème} et 4^{ème} lots.
3. Comparaison du **pourcentage d'utilisation des voies de passage** entre la radio-téléométrie et la technique RFID à l'aide de barplots. La répartition du pourcentage d'utilisation des voies de passage entre les 4 déversements a été analysée à l'aide du test exact de Fisher.
4. Comparaison **du délai de franchissement associé à chaque voie de passage** à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis et représentation des résultats à partir d'un boxplot.
5. Analyse de **l'influence des conditions environnementales et des variables morphologiques** sur le comportement des smolts à partir des données obtenues par les deux techniques. L'influence du débit de l'eau et de la taille des smolts ont été mis en évidence à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis. En ce qui concerne le débit de l'eau, les analyses ont été complétées d'un test de Mann-Whitney-Wilcoxon et les résultats ont été représentés à l'aide d'un boxplot. De plus, les périodes de franchissement du barrage de Méry (aube, jour, crépuscule et nuit) ont été comparées entre les 4 déversements à l'aide de barplots.
6. Analyse de **l'influence de la taille des smolts et la voie de passage empruntée à Méry** sur leur vitesse de progression en aval du barrage. L'influence de la taille a été déterminée à l'aide d'un test de Spearman et celle de la voie de passage empruntée à partir d'un test de Kruskal-Wallis.
7. Comparaison des **vitesse de migration dans différents biefs** de l'Ourthe à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis et d'un test de Mann-Whitney-Wilcoxon.
8. Comparaison des **délais de franchissement associés aux différents barrages** de l'Ourthe à partir d'un test de Mann-Whitney-Wilcoxon.
9. Comparaison des données de 2018 obtenues grâce au **monitoring du piège** avec les données obtenues depuis 2007 telles que les dates de première capture et de dernière capture, la température et le débit associés ainsi que la date pour le percentile 10, 50 et 90 de capture. L'analyse a été complétée d'un graphique illustrant les percentiles 10, 50 et 90 en fonction du débit et de la température de l'Ourthe de chaque année depuis 2007 afin de placer 2018 par rapport aux années précédentes. De plus, une analyse de la période de dévalaison a été réalisée à l'aide d'un graphique reprenant le nombre d'individus capturés dans le piège au cours de cette période en fonction du débit journalier de l'Ourthe et de sa température.

3. Résultat

3.1. Description des comportements individuels de dévalaison

Pour chaque smolt, un patron de mobilité et une représentation de leur comportement précis de recherche en amont du barrage de Méry ont tout d'abord été établis afin de mettre en avant la diversité individuelle des choix réalisés par chaque individu. Cette phase, plus descriptive, a toute son importance, en amont d'analyses plus synthétiques qui seront présentées par la suite.

3.1.1. Smolts du lot n°1

Les smolts du premier lot ont été déversés le 9 avril à 21h. Au moment du déversement, le débit de l'Ourthe à Méry était de 37,2 m³/s et la température de 12,15°C.

Smolt 1

Le smolt n°1 a entamé sa dévalaison à 21h15. Il s'est ensuite arrêté pendant 2h21 au niveau d'un pont routier, à 425m en amont du barrage de Méry (Fig. 12A). À 00h52, il a atteint le site hydroélectrique de Méry et a mis 4min pour trouver une voie de passage via le centre du barrage et a poursuivi sa dévalaison (Planche n°2 : A). Aux alentours de 1h50, le smolt n°1 a franchi le barrage de Tilff et a dévalé jusqu'à 800m en amont du barrage de Colonster à une vitesse de 0,99 m/s avant de s'arrêter. Sa dernière localisation a été effectuée à 2h30 à cet endroit, 6770m en aval du point de déversement (Fig. 12A).

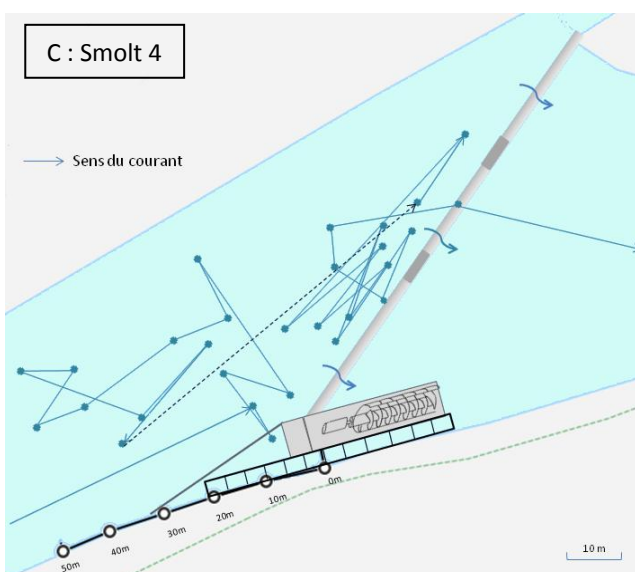
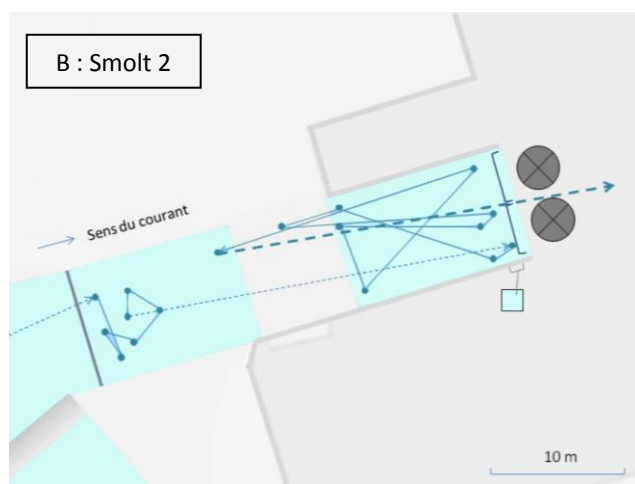
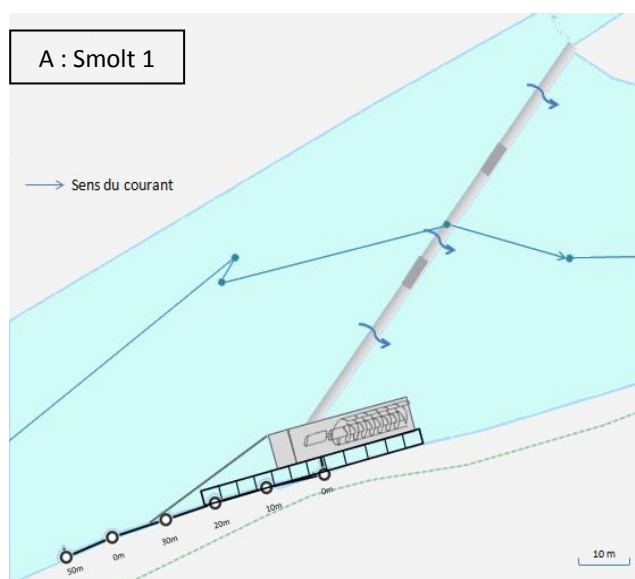
Smolt 2

Le smolt n°2 n'a pas débuté sa dévalaison le jour du déversement. Il a été retrouvé le 11 avril à 12h35 à l'entrée du canal de prise d'eau des turbines Kaplan en rive gauche et y est resté jusque 16h (Planche n°2 : B). A 20h, il s'est positionné devant l'exutoire de dévalaison, zone dans laquelle il est resté jusque 21h15. Son signal a ensuite été perdu et la voie de passage n'a pu être déterminée.

Smolt 3

Le smolt n°3 n'a pas débuté sa dévalaison le jour du déversement. Il a été retrouvé le lendemain au niveau du pont routier en amont du barrage de Campana, ce qui constitue sa dernière localisation. Etant donné le peu de données concernant ce smolt, aucune carte ou patron de mobilité n'a pu être construit.

Planche n°2



Comportement fin de recherche des smolts radio-marqués du 1^{er} lot en amont du complexe hydro-électrique de Méry. A) Smolt 1, B) Smolt 2 & C) Smolt 4

Smolt 4

Le smolt n°4 a démarré sa migration à 23h05 (Fig. 12B). Il est arrivé au niveau du site hydro-électrique de Méry à 23h38. Jusque 1h20, ses positions se sont concentrées de 10 à 50m en amont du barrage de Méry. Ensuite, le 10 avril, il a été retrouvé à 10h39 juste en amont du barrage à proximité de l'une des deux échancrures, inutilisables à cause du débit (Planche n°2 : C). Il a effectué plusieurs allers-retours le long du barrage avant de le franchir par sa partie centrale à 20h26 après 20h48min de temps de recherche. Il a atteint le barrage de Tilff à 22h42 avec une vitesse moyenne de 0,38 m/s et l'a franchi en 4 minutes avant de poursuivre sa route avec une vitesse moyenne de 0,66 m/s (Fig. 12B). Il est arrivé au niveau du barrage de Colonster à 00h08 et l'a franchi en 3min. La dernière localisation a été effectuée à 00h11 à 8000m en aval du point de déversement.

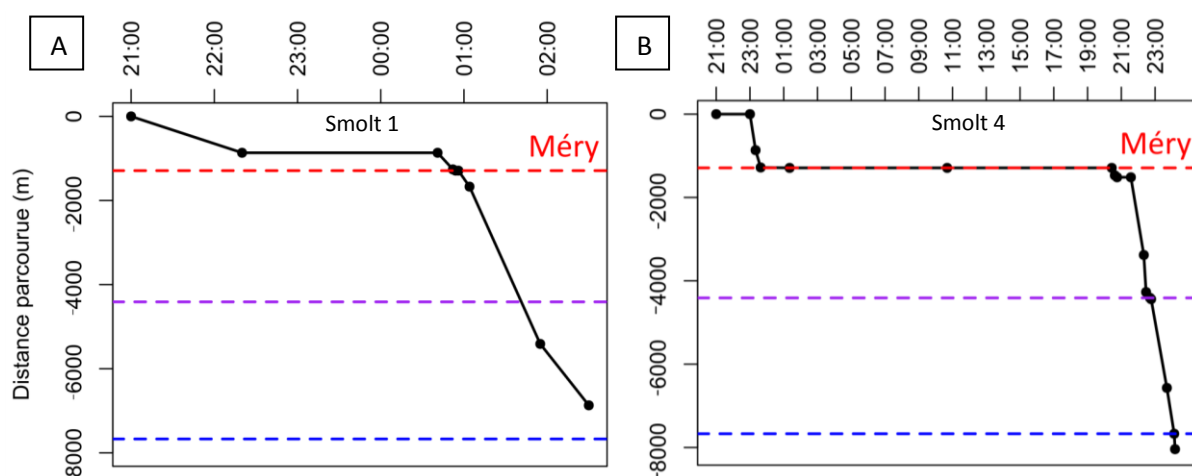


Figure 12: Patrons de mobilité des smolts radio-marqués du 1^{er} lot le long de basse Ourthe. A) smolt 1 et B) smolt 4

Légende : (—) Méry – (—) Tilff – (—) Colonster – (—) Campana – (—) Streupas – (—) Grosses Battes

3.1.2. Smolts du lot n°2

Les smolts du 2^{ème} lot ont été déversés le 19 avril à 18h30. Au moment du déversement, le débit de l'Ourthe à Méry était de 24,1m³/s et la température de 16,2°C.

Smolt 5

Le smolt n°5 a débuté sa migration à 18h40 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 19h15 en se dirigeant vers le canal de la prise d'eau des turbines Kaplan (Fig. 13A). Ses positions se sont principalement concentrées en rive droite dont la première à l'entrée de l'exutoire de dévalaison à 21h40 (Planche n°3 : A). Il est resté en amont des dégrilleurs pendant 4h47 avant de franchir le site par les turbines Kaplan à 00h02. À 1h17, le smolt a atteint le barrage de Tilff avec une vitesse moyenne de 0,69m/s et l'a franchi en 8 min (Fig.

13A). Il a ensuite dévalé à 0,44m/s avant de s'arrêter vers 3h à 730m en amont du barrage de Colonster, qui est sa dernière position, 6940m en aval du point de déversement.

Smolt 6

Le smolt n°6 a initié sa dévalaison à 18h40 et est arrivé à 50m du site hydro-électrique de Méry à 22h49 (Fig. 13B). Il s'est d'abord positionné à 23h04 à 100m du barrage puis s'est retrouvé à 250m à 1h57 (Planche n°3 : B). Le 20 avril, vers 8h45, l'individu a été localisé à proximité de la drome en amont de la vis d'Archimède et y a effectué des déplacements sur de courtes distances pendant un peu moins de 7h. À 15h30, le smolt s'est positionné en rive gauche et vers 19h, il a alterné rive gauche et rive droite puis s'est rapproché à nouveau de la drome à 21h10. À 21h23, il est passé sous la drome et a traversé la vis d'Archimède à 21h35. Le délai de franchissement était de 22hh46. Il a ensuite dévalé avec une vitesse moyenne de 0,38m/s jusqu'au barrage de Tilff qui a été franchi sans s'arrêter (Fig. 13B). Le smolt a poursuivi sa dévalaison avec une vitesse moyenne de 0,62m/s avant de s'arrêter à 1000m en amont du barrage de Colonster à 00h40 qui est sa dernière localisation, 6670m en aval du point de déversement.

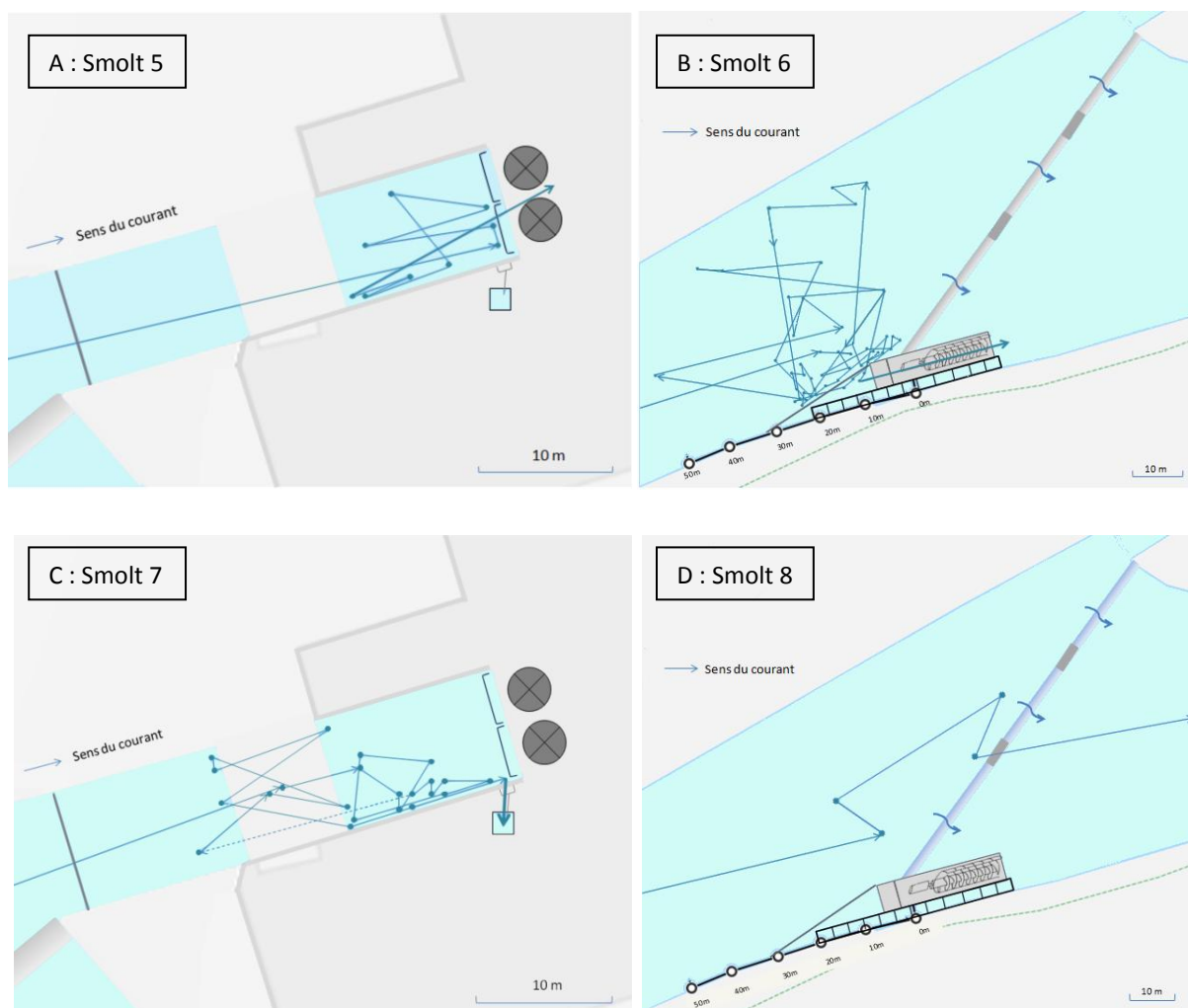
Smolt 7

Le smolt n°7 a débuté sa migration à 18h30 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 19h23. Il a pénétré le canal de la prise d'eau des turbines Kaplan à 21h38 après avoir longé le déversoir (Planche n°3 : C). Jusqu'à 2h du matin, les positions du smolt se sont concentrées à proximité de l'exutoire de dévalaison principalement en rive droite. Le 20 avril, à 10h45, il a été localisé au centre du canal de la prise d'eau en effectuant plusieurs allers-retours. La dernière localisation a été le 23 avril à 10h dans le piège de dévalaison.

Smolt 8

Le smolt n°8 a initié sa dévalaison à 18h32 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 19h29 (Fig. 13C). En ne montrant que très peu de comportements de recherche, il l'a franchi par le déversoir à 19h40, après 11min (Planche n°3 : D). Il a atteint le barrage de Colonster à 23h24 avec une vitesse moyenne de 0,48 m/s (Fig. 13C). Avant de le franchir, le smolt a semblé hésiter et a remonté la rivière de 730m. A 1h06, il a été localisé à 100m du barrage de Campana. Après avoir franchi le barrage, il a fortement ralenti sa dévalaison en aval pendant 1h. La dernière localisation a été effectuée le 20 avril, à 400m en amont du barrage de Colonster et à 11274m en aval du point de déversement.

Planche n°3



Comportement fin de recherche des smolts radio-marqués du 2^{ème} lot en amont du complexe hydro-électrique de Méry. A) Smolt 5, B) Smolt 6, C) Smolt 7 & D) Smolt 8

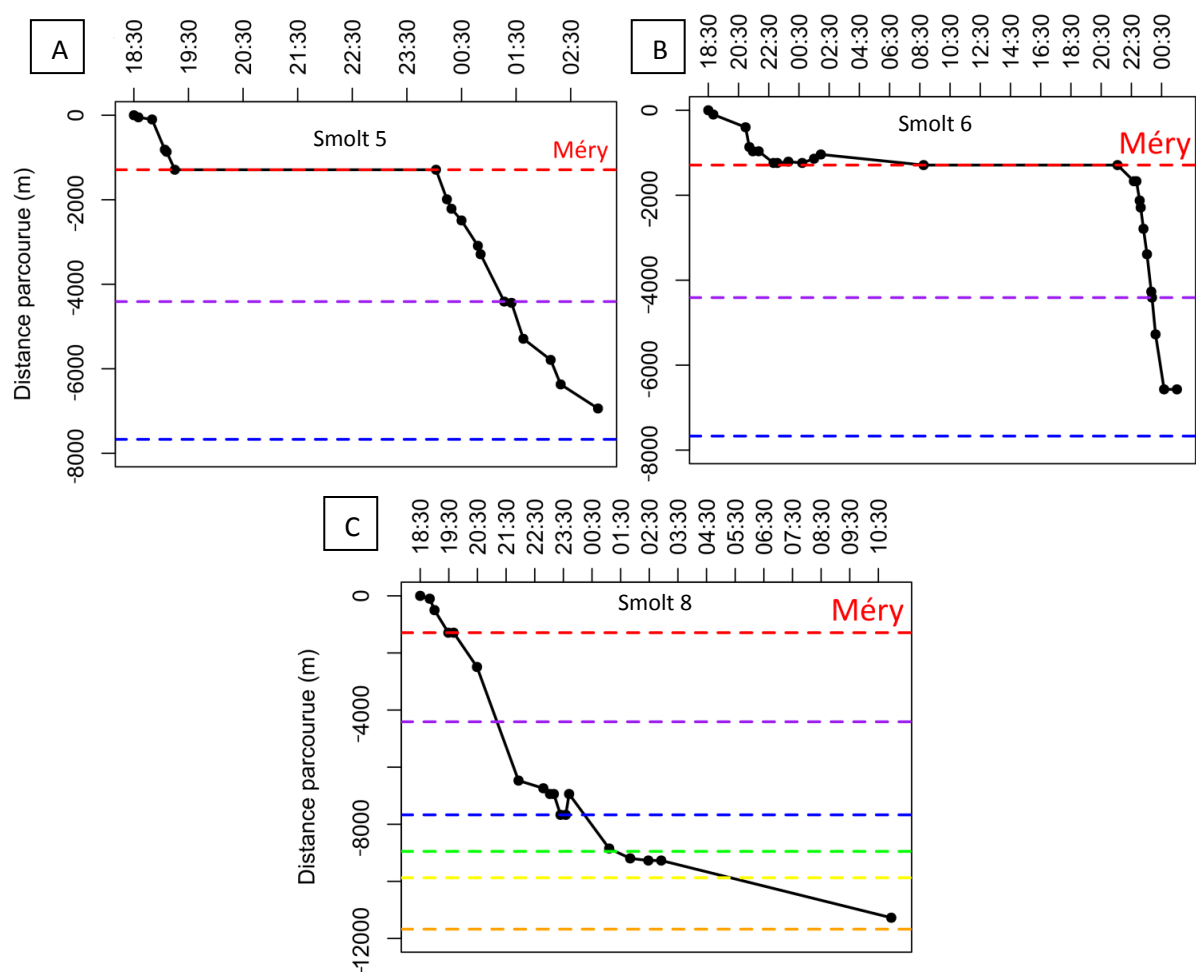


Figure 13: Patrons de mobilité des smolts radio-marqués du 2^{ème} lot le long de la basse Ourthe. A) smolt 5; B) smolt 6 ; C) smolt 8

Légende : (—) Méry – (—) Tilff – (—) Colonster – (—) Campana – (—) Streupas – (—) Grosses Battes

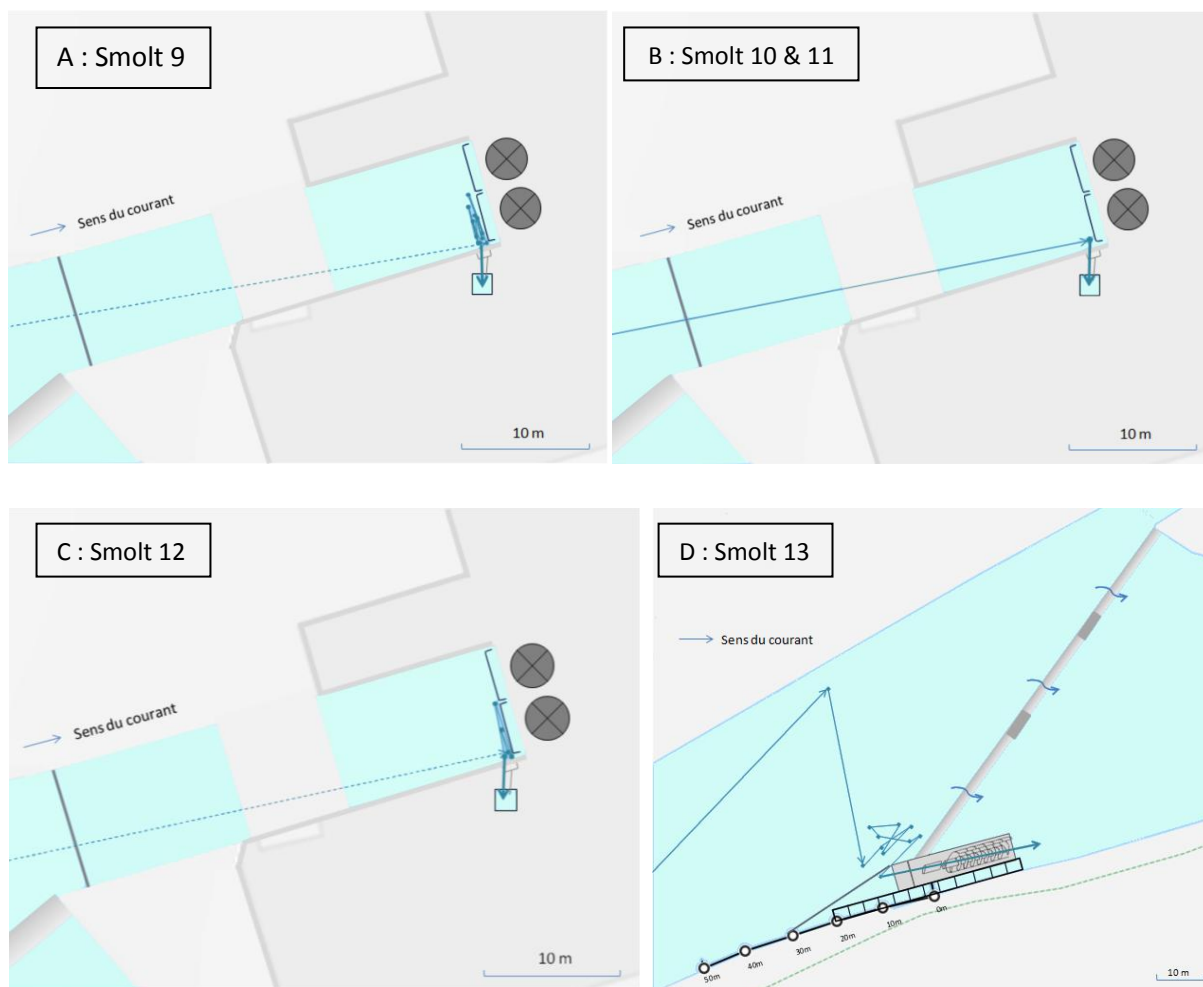
3.1.3. Smolts du lot n°3

Les smolts du 3^{ème} lot ont été déversés le 26 avril à 15h45. Au moment du déversement, le débit de l'Ourthe à Méry était de 18m³/s et la température de 14°C.

Smolt 9

Le smolt n°9 a démarré sa migration à 15h50 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 17h (Fig. 14A). Il s'est dirigé vers le canal de la prise d'eau et a été localisé à 17h05 à l'entrée de l'exutoire de dévalaison. Le smolt a effectué plusieurs allers-retours le long du dégrilleur avant de rester 1h à l'entrée de l'exutoire (Planche n°4: A). Le smolt, observable à l'œil nu, s'est positionné en rhéotaxie positive aussi bien en amont des grilles que lors du passage par l'exutoire. Il y est passé à 21h30 après 4h30 de recherche. Après un contrôle manuel de l'exutoire, il a été relâché à 21h45 et a atteint le barrage de Tilff à 22h56 à 0,74m/s (Fig. 14A). Il a poursuivi sa dévalaison jusqu'à 600m en amont du barrage de Colonster à une vitesse moyenne de 0,4m/s.

Planche n°4



Comportement fin de recherche des smolts radio-marqués du 3^{ème} lot en amont du complexe hydro-électrique de Méry. A) Smolt 9, B) Smolt 10 et 11, C) Smolt 12 & D) Smolt 13

Une fois le barrage franchi, le smolt a dévalé en moyenne à 0,17m/s jusqu'à 500m en aval du barrage de Campana. Sa vitesse moyenne s'est ensuite accélérée à 1,9m/s. Le smolt a été localisé pour la dernière fois à 2h09, à 514m du barrage des Grosses Battes, à 11160m en aval du point de déversement.

Smolt 10

Le smolt n°10 a débuté sa migration à 15h50 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 16h44 en rive droite (Fig. 14B). Il s'est dirigé vers le canal de prise d'eau des turbines et s'est positionné à l'entrée de l'exutoire de dévalaison à 17h18. Le smolt a emprunté l'exutoire à 18h22 après 1h38 (Planche n°4 : B). Après un contrôle manuel du piège, il a été remis à l'eau et à 19h27 et est arrivé au barrage de Tilff à une vitesse moyenne de 0,67m/s (Fig. 14B). Le smolt a marqué un arrêt de 3h à 1000m en amont du barrage de Colonster. Le 27 avril, à 11h15, il a été localisé au barrage de Colonster. Il lui aura fallu 8h pour effectuer le tronçon Tilff-Colonster. La dernière localisation a été effectuée à 11h43 à 20m en aval du barrage de Colonster et à 7690m en aval du point de déversement.

Smolt 11

Le smolt n°11 a dévalé à 15h50 et a atteint le site hydro-électrique de Méry en rive droite à 16h46 (Fig. 14C). Il s'est ensuite dirigé rapidement vers le canal de prise d'eau des turbines Kaplan, et s'est positionné à 17h10 à l'entrée de l'exutoire de dévalaison (Planche n°4 : B). Après 49min, à 17h30, il est passé par l'exutoire. Le smolt, relâché après contrôle du piège à 19h27, a dévalé 1200m avant de s'arrêter pendant 4h (Fig. 14C). Il a été localisé le 27 avril à 11h52, à 1000m en amont du barrage de Colonster. Vers 18h28, il a dévalé 600m pour ensuite remonter jusqu'à 1000m en amont du barrage. La dernière localisation a été effectuée à 19h56, 1200m en amont de ce barrage, 6470m en aval du point de déversement.

Smolt 12

Le smolt n°12 a initié sa dévalaison à 18h30 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 19h25 (Fig. 14D). Il s'est déplacé vers le canal de prise d'eau des turbines et a été localisé à l'entrée de l'exutoire de dévalaison à 19h28 (Planche n°4 : C). Le smolt a effectué des déplacements le long du dégrilleur en amont des turbines Kaplan avant de se faire emporter après 1h dans l'exutoire de dévalaison à 20h15. Après contrôle de l'exutoire, il a été relâché à 20h23. Il a atteint le barrage de Colonster à 1h12 avec une vitesse moyenne de 0,37 m/s puis a marqué une pause de 29min, 250m en aval (Fig. 14D). Le 27 avril à 10h55, le smolt a été localisé en aval du barrage des Grosses Battes et à 13h46, il a été localisé pour la dernière fois à 780m en aval du barrage, 12454m en aval du point de déversement.

Smolt 13

Le smolt n°13 a débuté sa migration à 15h50 et a atteint le site hydro-électrique de Méry à 16h25 en rive gauche (Fig. 14E). Il s'est ensuite dirigé vers la vis d'Archimède en rive droite et est resté dans cette zone durant 1h (planche n°4 : D). Il a franchi le site par la vis d'Archimède à 17h23 pour atteindre le barrage de Tilff à 19h51, à une vitesse moyenne de

0,39m/s (Fig. 14E). Il a poursuivi sa dévalaison à une vitesse moyenne de 0,18m/s, pour atteindre le barrage de Colonster à 1h16 qu'il est parvenu à franchir sans marquer de pause. Il a continué son parcours sur environ 1km avant de s'arrêter. Le 27 avril à 10h39, le smolt a été localisé 100m en aval des Grosses Battes et a été localisée pour la dernière fois à 13h38 à 100m en aval du barrage des Grosses Battes, 11774m en aval du point de déversement.

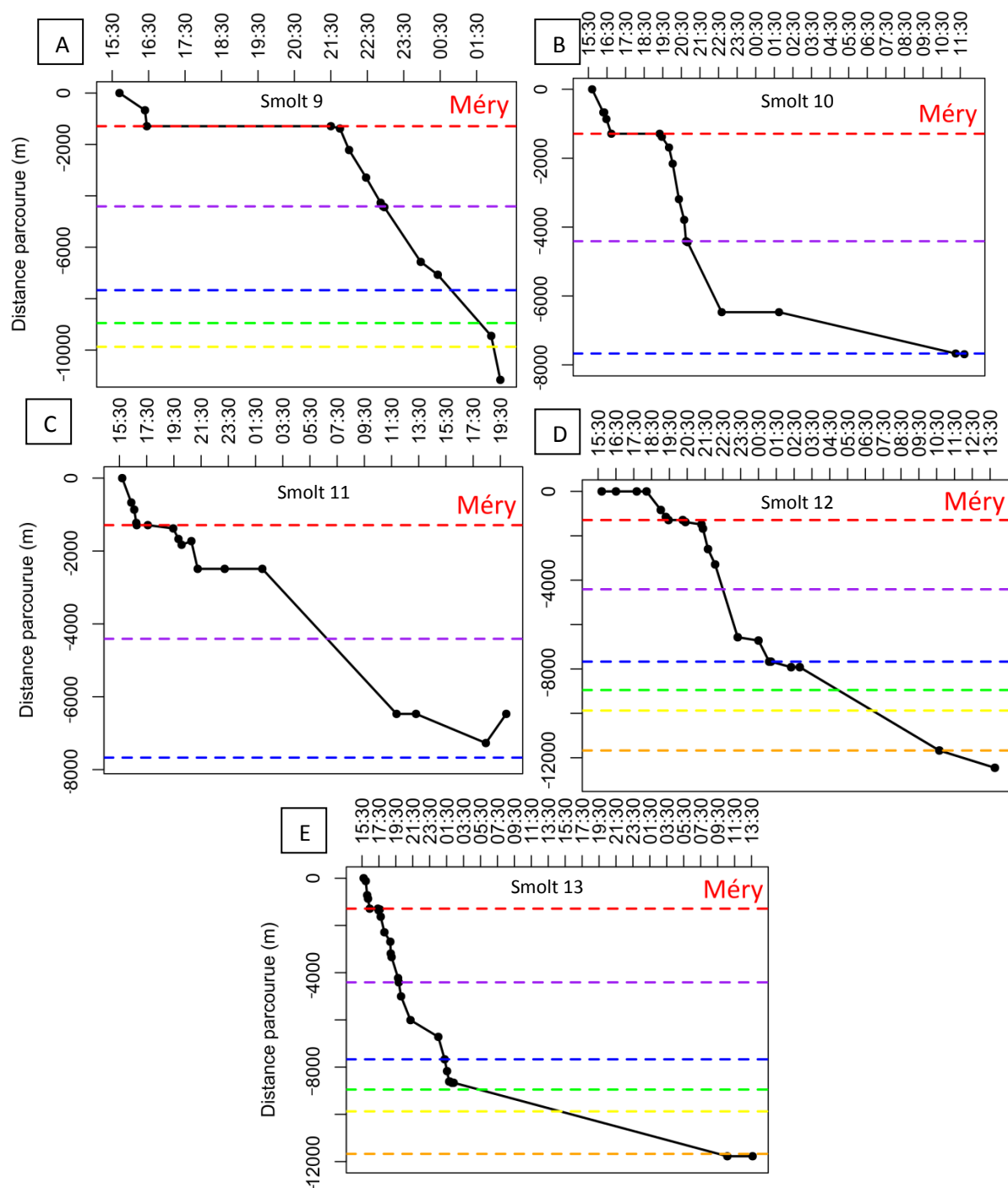


Figure 14: Patrons de mobilité des smolts radio-marqués du 3^{ème} lot le long de la basse Ourthe. A) smolt 9 ; B) smolt 10 ; C) smolt 11 ; D) smolt 12 et E) smolt 13

Légende : (—) Méry – (—) Tilff – (—) Colonster – (—) Campana – (—) Streupas – (—) Grosses Battes

3.1.1. Smolts du lot n°4

Les smolts du 4^{ème} lot ont été déversés le 17 mai à 16h15. Au moment du déversement, le débit de l'Ourthe à Méry était de 20,1m³/s et la température de 17,6°C.

Smolt 14

Le smolt n°14 a initié sa dévalaison à 16h19 et a atteint le barrage de Méry à 17h16 (Fig. 15A). À 17h24, il s'est dirigé vers le canal de prise d'eau des turbines Kaplan et est entré rapidement dans l'exutoire de dévalaison à 17h36 (Planche n°5 : A). Après un contrôle du piège, il a été relâché à 19h25 et a marqué une pause pendant presque 3h, 380m en aval du barrage de Méry (Fig. 15A). Le 18 mai, à 10h47, le smolt a été localisé à 900m en amont du barrage des Grosses Battes. La dernière localisation a été effectuée à 12h30 à 700m en aval du barrage des Grosses Battes, à 10974m en aval du point de déversement.

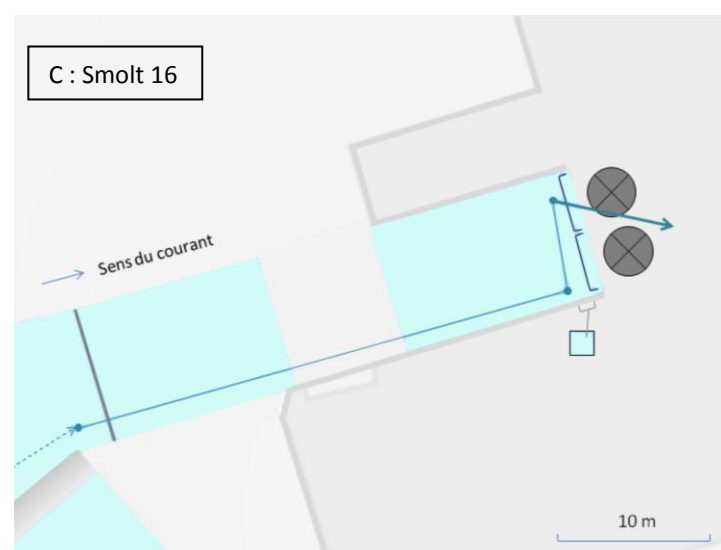
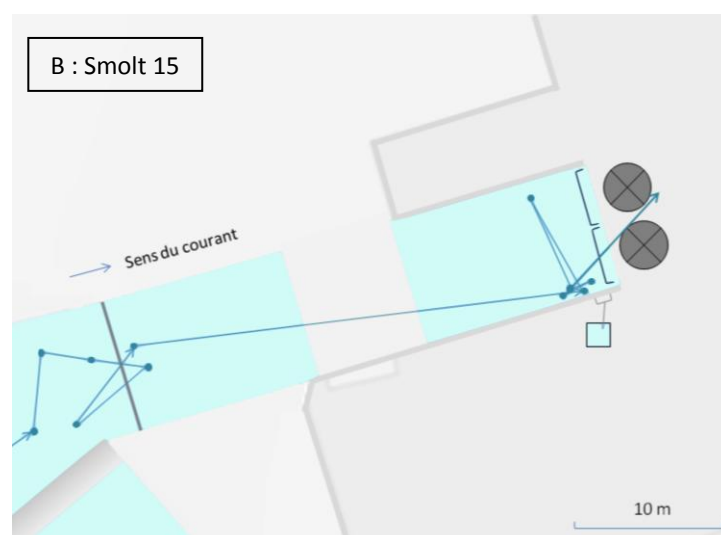
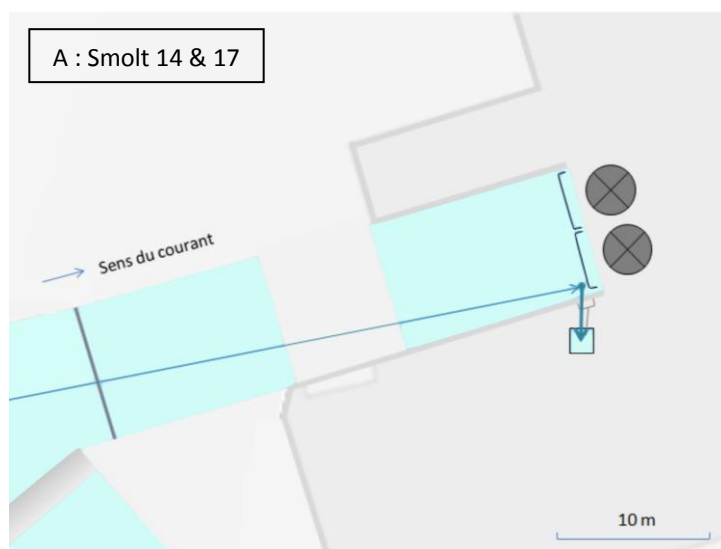
Smolt 15

Le smolt n°15 a débuté sa dévalaison à 16h15 et a atteint le barrage de Méry à 17h38 (Fig. 15B). Il s'est déplacé vers le canal de prise d'eau des turbines Kaplan. Durant 1h22, ses positions se sont concentrées au niveau des vannes avant de se diriger vers la dégrilleur à 19h23 (Planche n°5 : B). Le smolt s'est ensuite déplacé jusqu'en rive gauche avant de refaire demi-tour et se positionner à l'entrée de l'exutoire. Il a franchi le barrage par les turbines Kaplan à 20h08 après 2h30 de recherche. A une vitesse moyenne de 0,65m/s, il est arrivé au barrage de Tilff à 21h06 et l'a franchi rapidement (Fig. 15B). Le smolt a poursuivi sa dévalaison avec une vitesse moyenne de 0,97m/s jusqu'à 1000m du barrage de Colonster à 22h03 et y est resté jusque 2h14. Le 18 mai, à 10h30, il a été localisé 500m en amont du barrage des Grosses Battes. La dernière localisation a été effectuée 10h55 au même endroit, 11174m en aval du point de déversement.

Smolt 16

Le smolt n°16 a initié sa dévalaison à 16h20 et a été détecté pour la première fois à 17h05 en amont des vannes du canal de prise d'eau des turbines Kaplan (Fig. 15C). Il s'est dirigé vers l'exutoire de dévalaison et s'est déplacé le long du dégrilleur avant de franchir le barrage par les turbines Kaplan en rive gauche à 17h25. À 18h25, il est arrivé au barrage de Tilff à une vitesse moyenne de 0,84m/s (Planche n°5 : C). Sans s'arrêter, il a poursuivi sa dévalaison avec une vitesse moyenne de 0,58m/s jusqu'au barrage de Colonster (Fig. 15C). Ensuite, 1h après, il atteint le barrage de Campana avec une vitesse moyenne de 0,33m/s. A 21h34, il a continué sa dévalaison avec une vitesse moyenne de 0,38m/s pour atteindre le barrage de Streupas à 22h15. À 23h40, le smolt est arrivé à hauteur du barrage des Grosses Battes avec une vitesse moyenne de 0,35m/s. La dernière localisation a été relevée à 00h53, 1600m en aval des Grosses Battes, 13274m en aval du point de déversement.

Planche n°5



Comportement fin de recherche des smolts radio-marqués du 4^{ème} lot en amont du complexe hydro-électrique de Méry. A) Smolt 14 et 17, B) Smolt 15 & C) Smolt 16

Smolt 17

Le smolt n°17 a débuté sa migration à 16h30 et est arrivé au barrage de Méry à 17h22 (Fig. 15D). À 17h24, il s'est déplacé jusqu'au canal de prise d'eau des turbines Kaplan et a été retrouvé dans le piège de l'exutoire de dévalaison à 18h08 (Planche n°5 : A). Relâché à 19h24 après un contrôle manuel du piège, il a poursuivi sa dévalaison à une vitesse moyenne de 0,78m/s (Fig. 15D) pour arriver au barrage de Tilff à 20h34 qu'il a franchi en 2min. À 22h15, il est arrivé à hauteur du barrage de Colonster à une vitesse moyenne de 0,55m/s. A 23h24, le smolt a atteint le barrage de Campana puis le barrage de Streupas à 00h18 avec une vitesse moyenne de 0,38m/s. La dernière localisation a été effectuée à 00h25, 26m en aval du barrage de Streupas et 9900m en aval du point de déversement.

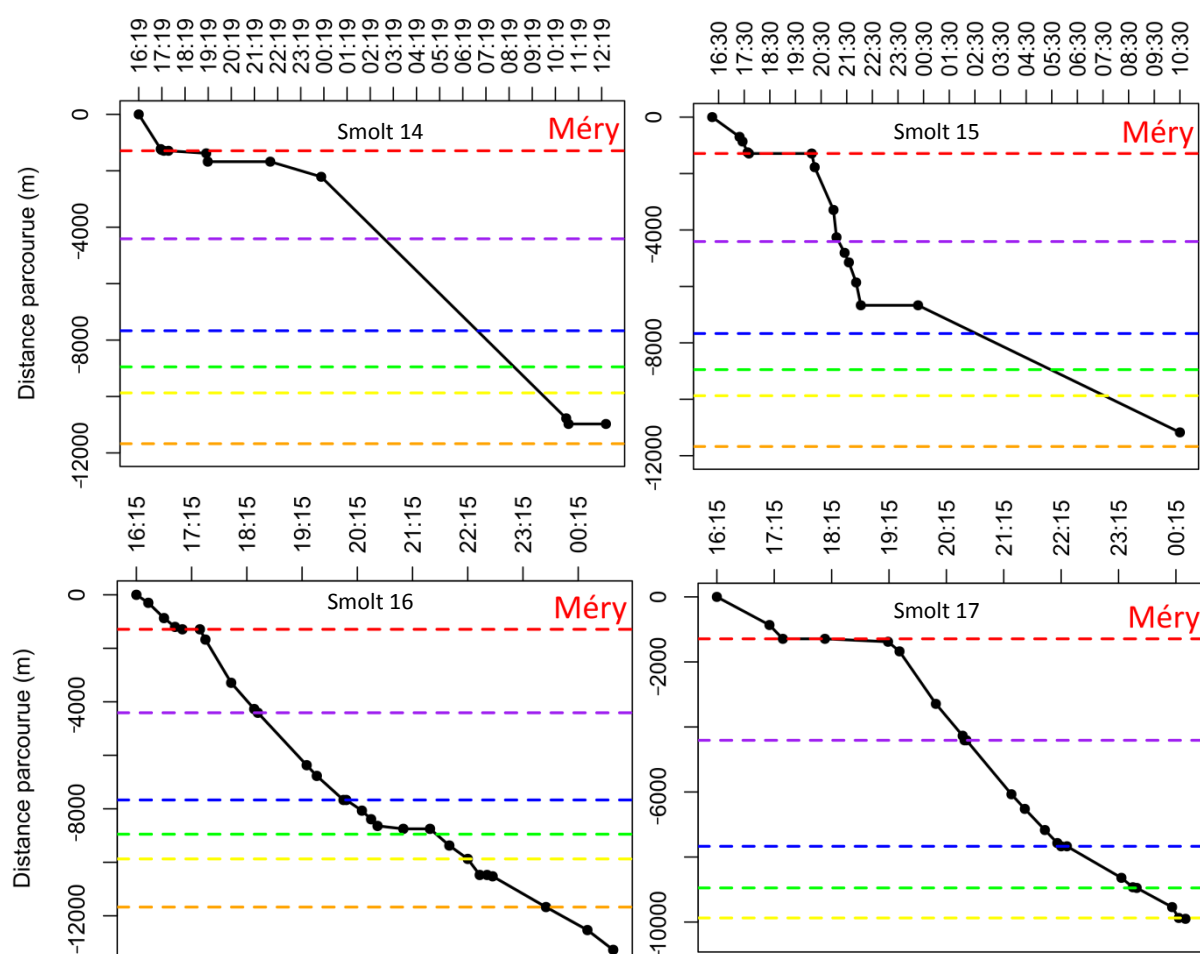


Figure 15: Patrons de mobilité des smolts radio-marqués du 4^{ème} lot le long de la basse Ourthe. A) smolt 14 ; B) smolt 15 ; C) smolt 16 ; D) smolt 17

Légende : (—) Méry – (—) Tilff – (—) Colonster – (—) Campana – (—) Streupas – (—) Grosses Battes

3.2. Attractivité et efficacité des voies de passage

Après la description de chaque comportement individuel, nous avons réalisé une analyse synthétique des comportements d'approche en amont du barrage de Méry à partir

des données obtenues des smolts radio-marqués et des smolts munis d'un transpondeur RFID afin de faire ressortir les zones de concentration des smolts lors de leur recherche d'une voie de passage.

3.2.1. Définition des zones de concentration

Afin d'étudier l'attractivité des voies de passage, à partir du comportement fin de chaque smolt, des cartes avec des zones de concentration ont été établies. Les 17 smolts ont été rassemblés en 2 groupes suivis dans des conditions de débit et de température similaires. Le 1^{er} comprend les 7 smolts du lot 1 et 2 (débit : 24,1 et 37,2 m³/s et température : 12,15 et 16,2°C) et le 2^{ème} les 9 smolts du lot 3 et 4 (débit : 18 et 20,1 m³/s et température : 14 et 17,6°C). Les cartes font ressortir des tendances similaires entre les deux groupes. Les smolts du 1^{er} et 2^{ème} groupe se sont positionnés préférentiellement à proximité du barrage et au sein du canal de prise d'eau des turbines Kaplan (Fig. 16A-B). La vis d'Archimède et la nouvelle échancrure paraissent quant à elles peu attractives avec la présence d'uniquement 2 smolts. Les deux groupes présentent des différences au niveau du nombre de smolts présents dans chacune de ces zones. Suivant les conditions de débit et de température, l'attractivité des voies diffère. En effet, lorsque la température est faible et le débit de la rivière élevé, la zone la plus attractive semble être le barrage (n=5/7 smolts contre n=2/9 smolts) (Fig. 16A) alors que lorsque la température est plus élevée et le débit de la rivière plus faible, les smolts se positionnent davantage dans le canal de prise d'eau des turbines (n=7/9 contre n=3/7) et plus précisément au niveau des vannes (n=4/9 contre n=1/7) et de l'exutoire de dévalaison (n=7/9 contre 3/7) (Fig. 16B).

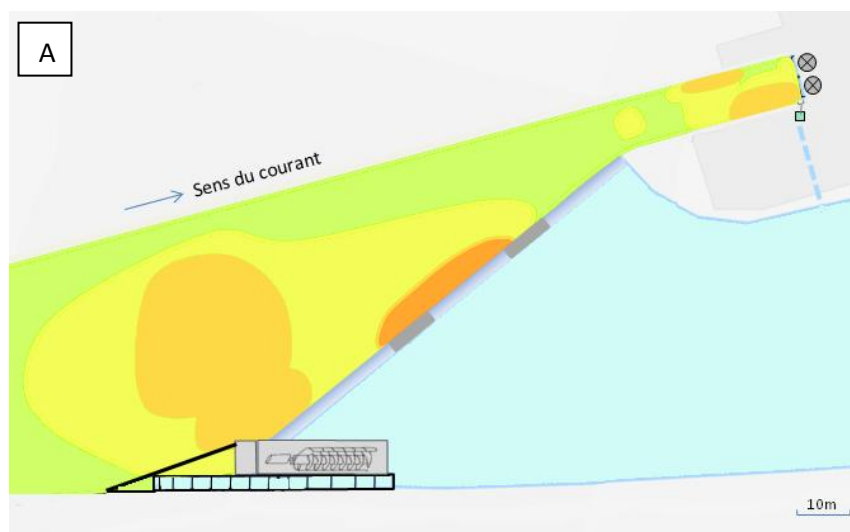




Figure 16: Zones des concentrations à partir du comportement fin de recherche des smolts en amont la centrale hydro-électrique de Méry. (A) Du lot 1 et 2 – (B) Du lot 3 et 4
Légende : nombre de smolts 0; 1 ; 2-4; 5-8; 9 et ++

En établissant une carte générale des zones de concentration (Fig. 17), tous groupes et toutes conditions confondus, on peut observer une certaine tendance des smolts à atteindre le site hydro-électrique de Méry majoritairement en rive droite ou par le centre du cours d'eau. Seuls 2 smolts se sont positionnés en rive gauche. La majorité des smolts s'est approchée de l'exutoire de dévalaison ($n=10/17$). Sur ces 10 individus, 6 se sont concentrés au niveau des vannes à l'entrée du canal de prise d'eau. En ce qui concerne l'attractivité du barrage, 6 smolts y ont été localisés en son centre. Les deux voies les moins attractives sont la vis d'Archimède et la nouvelle échancrure. Seuls 3 smolts s'y sont approchés et seulement 2 sont passés sous la drôme.

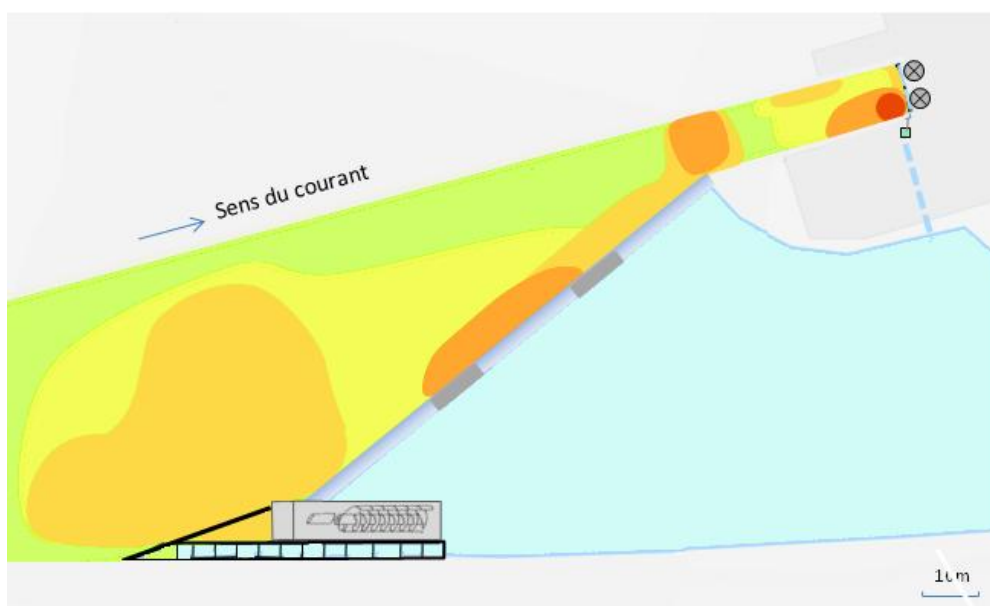


Figure 17: Zones des concentrations à partir du comportement fin de recherche des smolts des 4 lots en amont la centrale hydro-électrique de Méry
Légende : nombre de smolts 0; 1 ; 2-4; 5-8; 9 et ++

3.2.2. Utilisation des voies de passage

Une fois les zones de concentration mises en évidence, il est important d'analyser la voie de passage empruntée par chaque smolt. Pour cet objectif, les données obtenues par la technique RFID sur les 3 derniers déversements sont utiles en complément des suivis manuels par radio-télémétrie. Sur l'ensemble des smolts radio-marqués, 41% des poissons ($n=7/17$) ont utilisé l'exutoire de dévalaison (Fig. 18A) contre 45% des smolts marqués avec RFID ($n=68/150$) (Fig. 18B). Le pourcentage d'utilisation de la vis d'Archimède est de seulement 12% ($n=2/17$) pour les smolts radio marqués. En ce qui concerne les smolts RFID-marqués, seul 1% ($n=2/150$) se sont approchés de la vis d'Archimède. L'utilisation des turbines Kaplan est de 17% ($n=3/17$) pour les smolts radio-marqués et le même pourcentage (17%) pour le déversoir. Les smolts marqués RFID qui sont passés par les turbines Kaplan ou le barrage ne sont pas identifiables et sont dès lors, rassemblés et représentent 48% des individus ($n=72/150$). Seuls 9 smolts avec RFID sur les 167 utilisés ($n=17$ smolts radio-marqués et 150 smolts RFID-marqués) ont été détectés à proximité de l'échancrure.

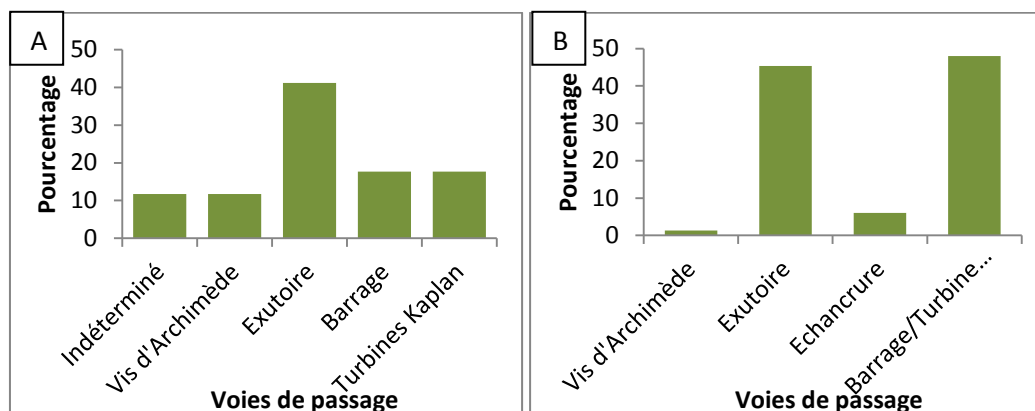


Figure 18: Taux de passage de chaque voie potentielle du site hydroélectrique pour A) les smolts radio-marqués & B) pour les smolts munis d'un RFID

Sans tenir compte de la catégorie « Indéterminé » en télémétrie radio, par le test exact de Fisher, on n'observe pas de différence significative dans l'utilisation des voies de passage entre les différents lots (p -value = 0,114). On peut tout de même observer sur le 1^{er} graphique, une diminution de l'utilisation du barrage comme voie de passage par les smolts radio marqués ainsi qu'une augmentation de l'utilisation de l'exutoire de dévalaison en lien avec une diminution de débit (Fig. 19A). Les turbines Kaplan et la vis d'Archimède sont peu utilisées par les 4 lots. En ce qui concerne la technique RFID, par le test exact de Fisher, on observe une différence significative entre les 3 derniers lots (p -value = 0,007) et plus précisément entre le 2^{ème} et 4^{ème} déversement (p -value = 0,002). L'utilisation de l'exutoire de dévalaison augmente de 26% à 58% entre les lots avec une diminution de débit (Fig. 19B).

L'utilisation du barrage et des turbines Kaplan varie entre 38% et 62% avec une diminution de son utilisation pour le lot 3 et 4. La vis d'Archimède et la nouvelle échancrure ne sont empruntées que par le 2ème et 3ème lot.

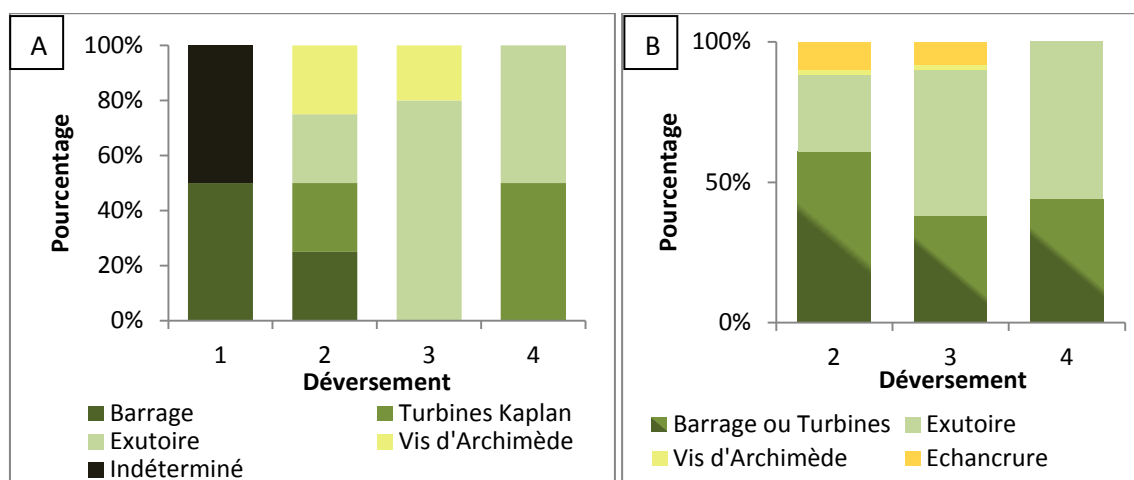


Figure 19: Pourcentage de passage de chaque voie par lot pour (A) les smolts radio-marqués & (B) les smolts munis d'un RFID

3.2.3. Essai d'estimation de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison

À partir des données obtenues des smolts radio-marqués, l'efficacité globale de l'exutoire de dévalaison est de 41%. L'efficacité corrigée de l'exutoire est supérieure avec 64%. Sur 17 smolts, 11 ont pénétré le canal de prise d'eau des turbines et 7 smolts ont effectivement emprunté l'exutoire de dévalaison. Pour les smolts RFID-marqués, l'efficacité globale est de 45%.

3.2.4. Délai de franchissement associé à chaque voie de passage

Le test de Kruskal-Wallis (p -value = 0,459) ne montre aucune différence significative du délai de franchissement entre les différentes voies de passage (Fig. 20). Il apparaît que les smolts semblent nécessiter moins de temps de recherche pour emprunter les turbines Kaplan ou l'exutoire de dévalaison avec respectivement un temps moyen de 2h31 et de 1h29 (médiane = 2h27 et 50min). La vis d'Archimède, par contre, est associée au délai de franchissement moyen le plus élevé avec 11h52. Le barrage nécessite un délai de franchissement moyen intermédiaire de 7h01 (médiane = 11min).

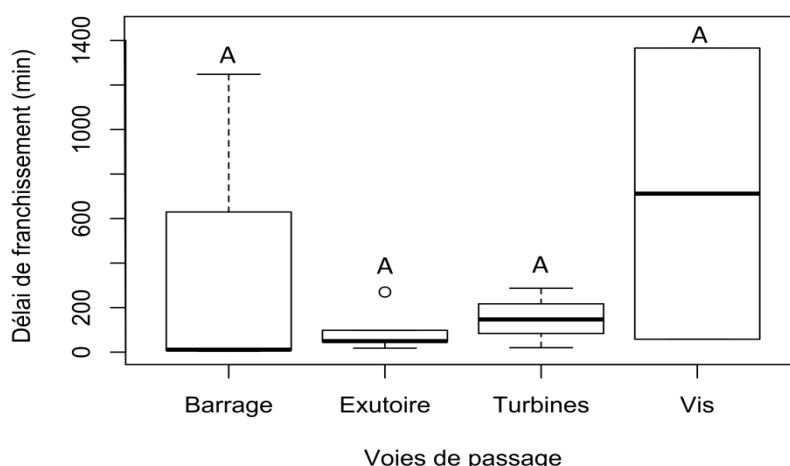


Figure 20: Délai de franchissement associé à chaque voie de passage et nécessaire pour franchir le barrage de Méry pour les smolts radio-marqués. A : représentant les différences significatives entre les différentes voies

3.3. Influence des conditions environnementales et variables morphologiques sur le comportement de dévalaison

Le comportement de dévalaison et le choix d'une voie de passage peuvent être influencés par plusieurs facteurs externes tels que le débit de la rivière, le rythme nyctéméral et la taille des smolts. Nous avons tenté de vérifier si ces facteurs peuvent avoir un impact sur le choix de la voie de dévalaison. Les données obtenues par la technique de télémétrie-radio et par la technique RFID ont été utilisées pour ces analyses.

3.3.1. Influence du débit de l'eau sur le choix d'une voie de passage

À partir des données des smolts radio-marqués, le test de Kruskal-Wallis suggère que le débit a une influence sur le choix de la voie de passage (p -value = 0,039) (Fig. 21-1). Lorsque l'on compare deux à deux, on observe une différence significative entre le barrage et l'exutoire de dévalaison (Mann-Whitney-Wilcoxon : p -value = 0,022). Le débit moyen le plus élevé est associé au passage par le barrage avec $35,9 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que le débit moyen le plus faible est associé à l'exutoire de dévalaison avec $18 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit moyen associé à la vis d'Archimède est relativement semblable à celui associé aux turbines Kaplan avec respectivement $20,4$ et $20,8 \text{ m}^3/\text{s}$. En ce qui concerne les données des smolts RFID-marqués, la différence n'est pas significative (Kruskal-Wallis : p -value = 0,261). Le débit moyen le plus élevé est associé à la nouvelle échancrure avec $42,1 \text{ m}^3/\text{s}$ et le plus faible à l'exutoire de dévalaison avec $19,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 21-2). En comparant les résultats des deux méthodes de suivi, les débits moyens obtenus pour l'exutoire de dévalaison sont similaires, avec respectivement 18 et $19,8 \text{ m}^3/\text{s}$. C'est également le cas pour la vis d'Archimède avec $20,4$ et $21 \text{ m}^3/\text{s}$.

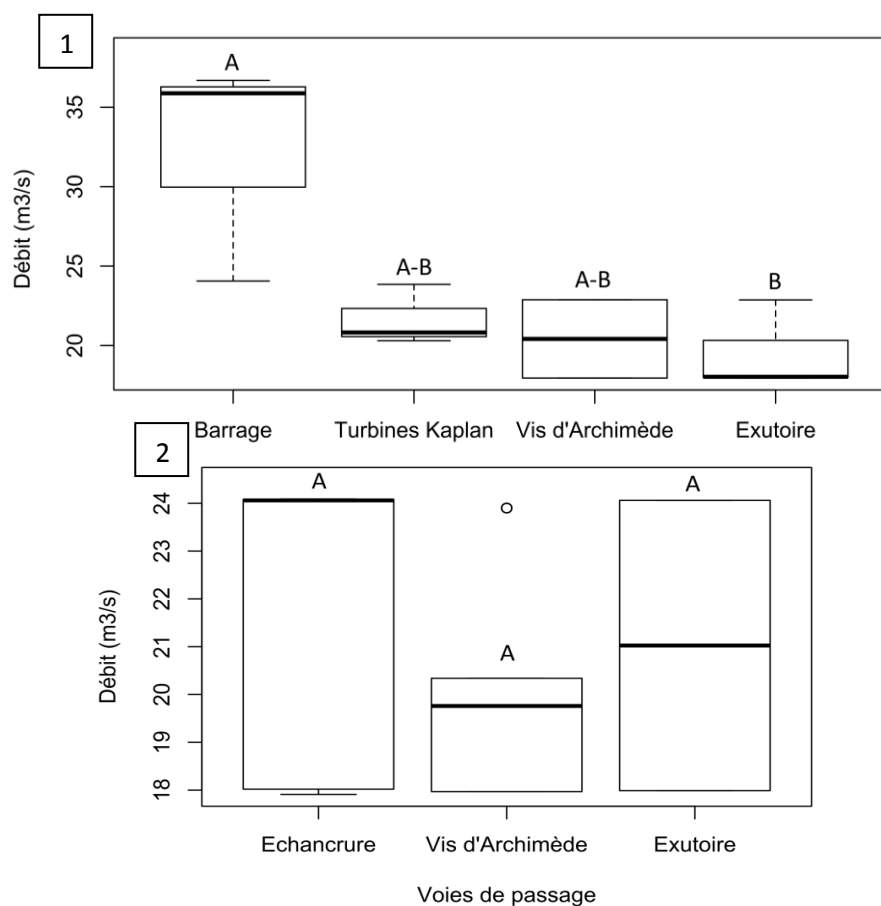


Figure 21: Débit du cours d'eau associé aux différentes voies de passage pour 1) les smolts radio-marqués et 2) les smolts RFID-marqués. A et B représentant les différences significatives entre les différentes voies

3.3.2. Influence de la taille des individus sur le choix d'une voie de passage

En comparant la taille moyenne associée aux différentes voies de passage, on n'observe pas d'influence de la taille sur le choix d'une voie de migration (Kruskal-Wallis : RADIO : p-value = 0.228 & RFID : p-value = 0.059) (Tab. 5).

Taille moyenne (mm)	Exutoire	Barrage	Turbines Kaplan	Vis d'archimède	Echancrure
RADIO	184	169	184	169,5	/
RFID	165	/		156	162

Tableau 5: La taille moyenne associée à chaque voie de passage pour les smolts radio-marqués et RFID-marqués

3.3.3. Rythme journalier de migration

Tout d'abord, en comparant les périodes de franchissement du site de Méry de chaque lot, la majorité des smolts a dévalé en journée ou lors du crépuscule (Fig. 22A, B, C & D). En ce qui concerne le crépuscule, les smolts qui sont répertoriés dans cette catégorie, ont franchi le site endéans 1h avant et après le coucher de soleil. Le crépuscule a débuté à des moments différents suivant les lots, respectivement 20h28, 20h41, 20h55 et à 21h28.

Cependant, lorsque l'on compare les 4 lots, on peut tout de même observer un avancement progressif de la période de franchissement du site pour *in fine* ne dévaler qu'en fin de journée avant le début du crépuscule. Ensuite, sur base du graphique synthétique, 56% des smolts radio-marqués et RFID-marqués ($n = 14/25$) ont franchi la centrale hydroélectrique de Méry en journée et principalement entre 16h40 et 18h30 (Fig. 22E). Au moment du crépuscule, 36% des smolts ($n = 9/25$) ont dévalé et franchi le site. Seuls deux smolts radio-marqués (8%) l'ont franchi pendant la nuit à respectivement 00h02 et 00h56. D'après le graphique 22E, on peut observer l'absence de smolts franchissant le barrage de Méry à l'aube.

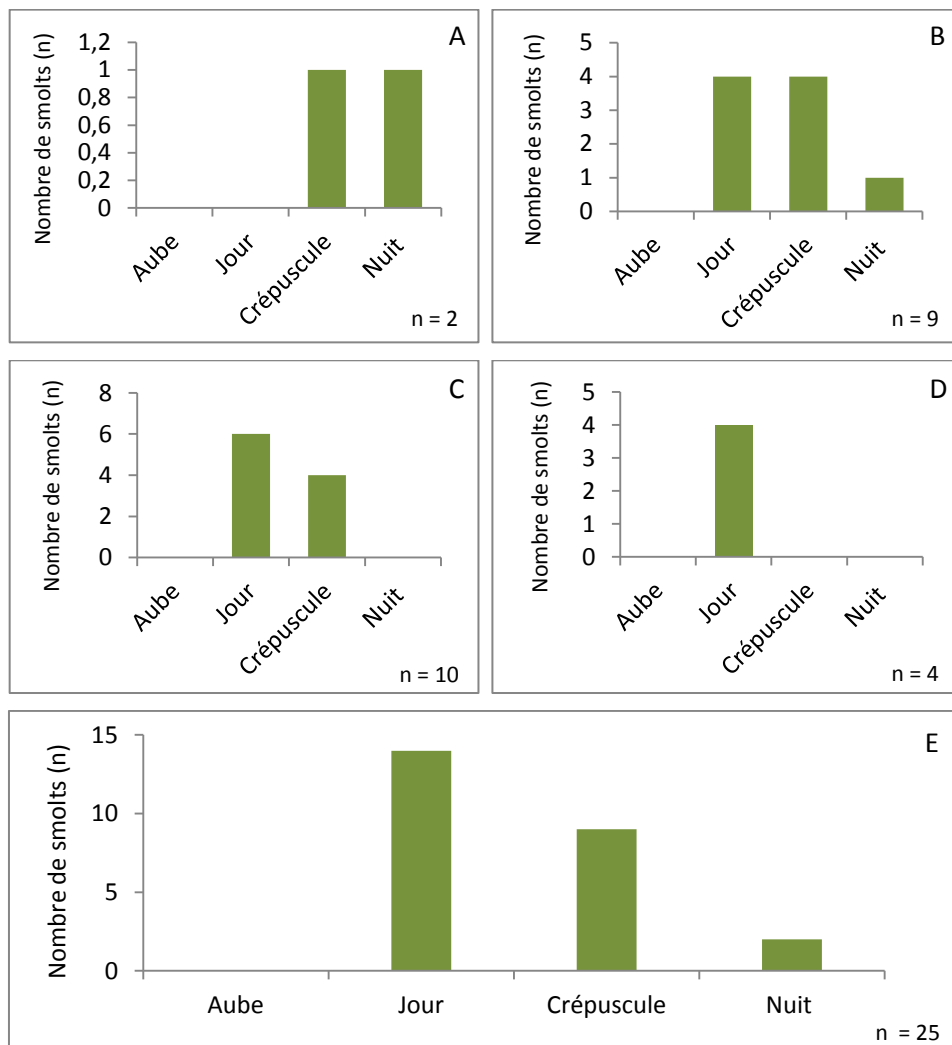


Figure 22: Représentation des périodes de franchissement de la centrale hydro-électrique de Méry pour les smolts radio-marqués et RFID-marqués A-D) pour chaque lot et E) tous lots confondus

3.4. Patrons de migration après le passage de Méry

3.4.1. Vitesse de progression des smolts

D'une manière générale, les smolts vont dévaler l'Ourthe avec une vitesse moyenne de 0,25m/s (médiane = 0,25m/s). Le smolt n°6 s'est déplacé avec la vitesse la plus faible de 0,07m/s et le smolt n°11 avec la vitesse la plus élevée de 0,44m/s (Tab. 6).

Smolts	1	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Vitesses (m/s)	0,36	0,09	0,23	0,07	0,19	0,31	0,11	0,44	0,28	0,17	0,16	0,31	0,43	0,35

Tableau 6: Vitesse de migration de 14 smolts radio-marqués le long de l'Ourthe du point de déversement au barrage des Grosses Battes

On observe aucune influence de la taille des smolts (corrélation de Spearman: p-value = 0,527, n = 10) ni de la voie de passage (Kruskall-Wallis: p-value = 0,124, n = 10) sur leur temps de parcours entre le barrage de Méry et le chemin de fer à 1000 m du barrage de Colonster.

3.4.2. Comparaison des vitesses de migration dans différents biefs de l'Ourthe

À partir des suivis radio, les vitesses minimales, moyennes et maximales entre les barrages ont été calculées (Tab. 7). La vitesse maximale et la vitesse moyenne les plus élevées de migration (respectivement, 1,14 m/s et 0,66 m/s) sont associées aux biefs entre le barrage de Méry et de Tilff. La vitesse moyenne la plus lente ($v = 0,31$ m/s) est associée au tronçon Colonster-Campana et la vitesse minimale la plus faible ($v = 0,07$ m/s) est associée au tronçon Tilff-Colonser. Le tronçon de déversement-Méry et Tilff-Colonser s'avèrent avoir une vitesse moyenne de déplacement relativement semblable, respectivement 0,39 m/s et 0,40m/s. Concernant le tronçon Tilff-Colonser, comme nous avons pu le constater, les smolts radio-marqués ont presque toujours effectué un ralentissement ou un arrêt à environ 1000 m en amont du barrage de Colonster, diminuant considérablement la vitesse moyenne de migration. En comparant les vitesses entre elles, on observe une différence significative (Kruskall-Wallis : p-value = 0,0159) et plus particulièrement entre A&B, B&D (Mann-Whitney-Wilcoxon : p-value = respectivement 0,016 et 0,002).

Vitesses (m/s)	Déversement à Méry (A) n= 15	Méry à Tilff (B) n= 12	Tilff à Colonster (C) n= 6	Colonster à Campana (D) n= 4
Vitesse Minimale	0,09	0,33	0,07	0,27
Vitesse Moyenne	0,39	0,66	0,40	0,31
Vitesse Maximale	0,65	1,14	0,66	0,34

Tableau 7: Vitesses minimales, moyennes et maximales des smolts radio-marqués pour chaque bief de l'Ourthe

3.4.3. Comparaison des délais de franchissement pour les différents barrages de l'Ourthe

Les temps minimal, moyen et maximal passés en amont des barrages ont été calculés pour les barrages de Méry et Tilff (Tab. 8). Le délai de franchissement pour le barrage de Méry varie de 4min à 22h46 avec une moyenne de 4h22 (médiane = 54min30). En ce qui concerne le barrage de Tilff, le délai de franchissement maximum est de 8min (moyenne = 1min35). Les deux barrages présentent une différence significative pour le délai nécessaire pour être franchi (Mann-Whitney-Wilcoxon : p-value = 0.00002).

Temps (heure)	Temps min.	Temps moyen	Temps max.
Barrage de Méry (n=14)	00:04	04:22:17	22:46
Barrage de Tilff (n=12)	00:00	00:01:35	00:08

Tableau 8: Délai de franchissement minimal, moyen et maximal pour des barrages présents de l'Ourthe

3.5. Monitoring du piège de l'exutoire de dévalaison

Le monitoring historique du piège de l'exutoire de dévalaison permet d'obtenir des données multi-annuelles précieuses sur les facteurs environnementaux déclencheurs de la migration. D'année en année, le timing migratoire a lieu lors d'une période similaire (Tab. 9). D'une manière générale, les valeurs de température et de débit de l'eau pour les percentiles 10, 50 et 90 sont relativement proches d'année en année (Fig. 23).

En 2018, les 3 premiers smolts ont été capturés le 16 mars, date semblable à celles des années précédentes (Tab. 9). La température de l'eau en 2018 (6,6°C) est légèrement inférieure à la température moyenne des années précédentes (7,6°C). Cependant, le débit de l'Ourthe associé à la 1^{ère} capture (81,4m³/s) représente presque le double du débit moyen (52,2 m³/s) obtenu pour les années précédentes. Les valeurs de débit lors de la première capture sont très variables allant de 28,1 à 81,3 m³/s. On atteint le percentile 10 (n = 139 smolts) le 18 avril, date relativement semblable à celles obtenues les autres années.

	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007
Période de piégeage	16/0	17/0	16/0	12/0	05/0	07/0	01/0	28/0	17/0	20/0	11/0	15/0
	3-	3-	3-	3-	3-	3-	3-	2-	3-	3-	4-	3-
	30/0	06/0	30/0	31/0	02/0	13/0	14/0	13/0	02/0	10/0	30/0	25/0
	5	6	5	5	6	6	6	5	6	6	5	5
Durée du piégeage (j)	75	82	76	81	90	99	106	85	77	52	50	70
Nombre de poissons	1393	766	101	373	4474	4502	2179	1367	517	147	35	671
Date 1ère capture	16-mars	23-mars	30-mars	19-mars	10-mars	11-mars	05-mars	03-mars	24-mars	20-mars	22-avr	23-mars
Temp. 1ère capture (°C)	6,6	7,6	8,6	8	7,5	7,4	7,7	5	8,2	6,5	11,2	5,7
Débit 1ère capture (m³/s)	81,3	60,2	63,5	31,9	28,1	41	41,8	60	62	56	61	77
Date dernière capture	22-mai	29-mai	30-mai	18-mai	30-mai	16-juin	14-juin	13-mai	31-mai	05-juin	21-mai	11-mai
Temp. dernière capture (°C)	17,5	23,4	15,1	15,2	16,5	16,3	14,6	17,5	14,4	14,3	14,7	14,7
Débit dernière capture (m³/s)	15,5	10,6	59,2	14,6	9,3	24,3	18,8	9,5	16	18,5	18	25
Date > 10% captures	18-avr	14-avr	30-mars	31-mars	07-avr	25-avr	06-avr	04-avr	11-avr	12-avr	28-avr	15-avr
Date > 50 % captures	23-avr	8-mai	21-avr	27-avr	22-avr	2-mai	23-avr	11-avr	19-avr	16-avr	7-mai	23-avr
Date > 90% captures	25-avr	17-mai	2-mai	6-mai	2-mai	8-mai	3-mai	26-avr	14-mai	5-mai	18-mai	30-avr

Tableau 9 : Comparaison des caractéristiques de la dévalaison des smolts dans l'Ourthe à Méry depuis 2007 jusqu'en 2018

On peut remarquer que la température (13,78°C) et de débit (26,44m³/s) de la rivière en 2018 sont similaires à la température et le débit moyen obtenus lors des années précédentes (respectivement 12,69°C et 27,57m³/s) (Fig. 23). Ensuite, progressivement, le nombre de smolts capturés augmente pour atteindre un pic de dévalaison avec 455 individus le 23 avril, jour où plus de 50% des smolts (n = 696 smolts) ont été piégés (Tab. 9). En 2018, la température obtenue pour le percentile 50 représente la valeur la plus élevée avec 17°C, valeur supérieure à la température moyenne de 12,74°C (Fig. 23). Par contre, en ce qui concerne le débit de l'Ourthe, en 2018, il était inférieur (21,65m³/s) au débit moyen des années précédentes (27,93 m³/s) (Tab. 9). L'année 2018 a atteint le plus rapidement les 90% de capture, le 28 avril avec 1254 smolts capturés. Pour le percentile 90, un débit de l'Ourthe plus faible (19,65m³/s) que le débit moyen (28,45m³/s) des années précédentes a été observé (Fig. 23). Au fur et à mesure que la période de dévalaison progresse, le nombre de smolts capturés dans le piège diminue et les 2 derniers ont été retrouvés le 22 mai (Tab. 9). La dernière capture a eu lieu légèrement plus tôt que la date moyenne obtenue (28 mai) historiquement avec le 4^{ème} débit le plus faible (15,53 m³/s) et à la 2^{ème} température la plus élevée (17,5°C). La température et le débit moyen de l'eau sont respectivement de 16,18°C et de 19,98m³/s. En ce qui concerne les captures de smolts, lorsque l'on compare avec les données des années précédentes, l'année 2018, précédée des années 2012, 2013 et 2014 avec respectivement 2179, 4502 et 4474 smolts capturés, représente la 4^{ème} meilleure année pour la dévalaison avec 1393 smolts piégés sur 72 jours.

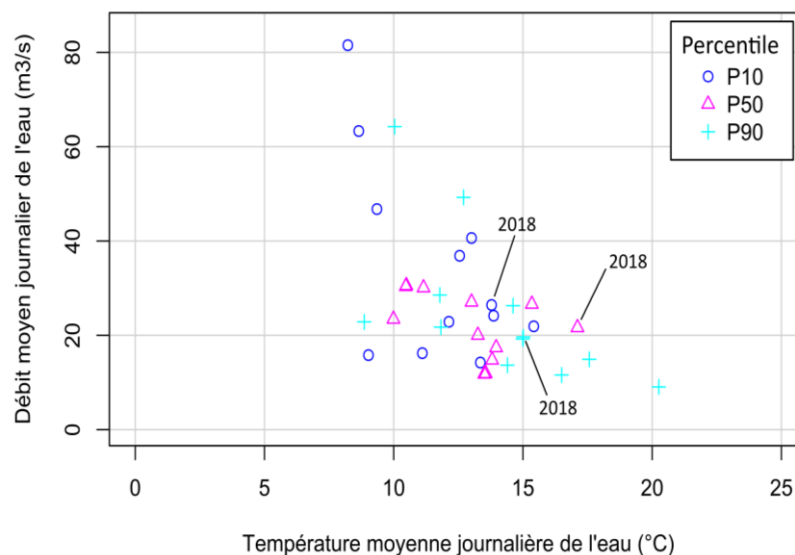


Figure 23: Percentile P10,P50,P90 de capture de smolts dans le piège de l'exutoire de dévalaison du site hydro-électrique de Méry depuis 2007 en fonction du débit moyen journalier et de la température moyenne journalière

Le graphique du nombre de capture de smolts à Méry pour le printemps 2018 (Fig. 24) montre la tendance des smolts à emprunter l'exutoire de dévalaison lorsque le débit passe sous la barre des 40m³/s et lorsque la température atteint les 10°C. Progressivement

le nombre de smolt augmente avec la diminution du débit et l'augmentation de la température pour atteindre un pic de dévalaison de 455 smolts le 23 avril avec un débit de $21,65\text{m}^3/\text{s}$ et une température de $16,84^\circ\text{C}$. Le piégeage de smolts chute ensuite rapidement les jours suivants. Le 30 avril, l'augmentation brutale du débit de l'eau ($57,68\text{m}^3/\text{s}$) a influencé le passage de 83 smolts par l'exutoire de dévalaison, dernier pic de smolts dévalant passant par le piège en 2018.

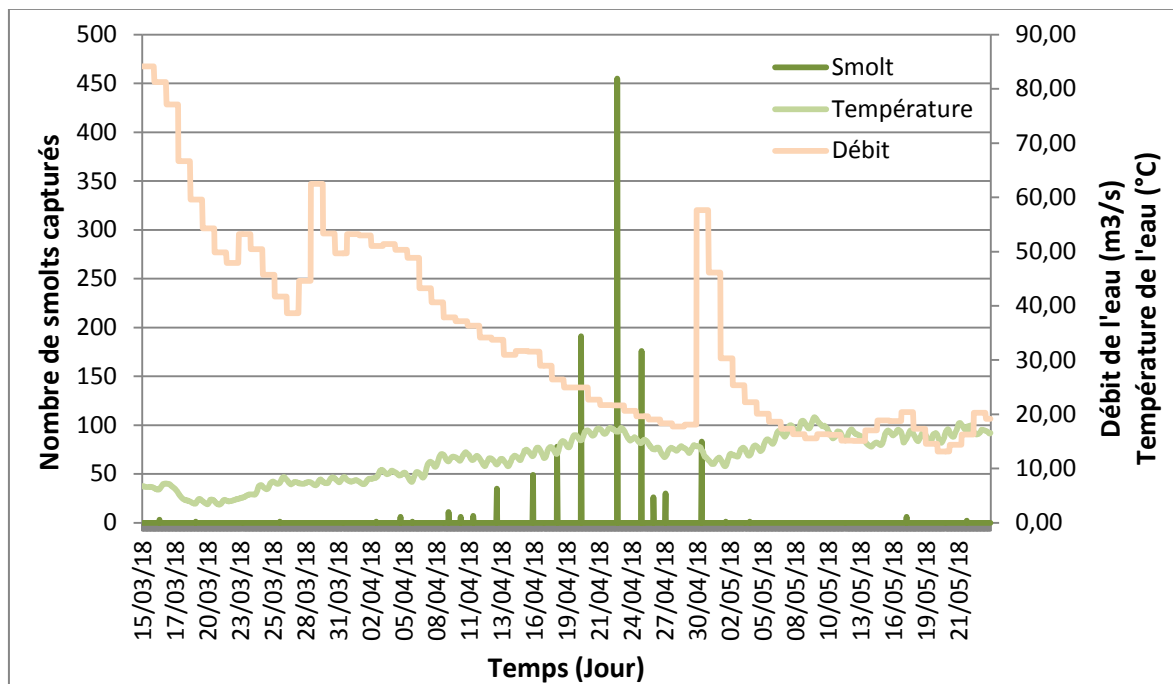


Figure 24: Nombre de smolts capturés dans le piège associé à l'exutoire de dévalaison en fonction de la température ($^\circ\text{C}$) et le débit de l'eau (m^3/s) de l'Ourthe à hauteur de Méry

4. Discussion

4.1. Adéquation des méthodes utilisées

Cette étude préliminaire par télémétrie sur le site de Méry a permis de répondre aux objectifs qui étaient posés, et la méthodologie et le matériel utilisés se sont révélés adaptés pour le budget qui était disponible. Dans le futur, si des moyens financiers accrus sont dégagés, il serait possible d'améliorer la méthodologie et d'étendre les capacités des dispositifs de réception. En télémétrie radio, le suivi uniquement manuel s'est avéré parfois limitant pour obtenir avec précision des données sur les smolts en amont de la centrale hydro-électrique de Méry. Etant donné la présence simultanée de plusieurs smolts en amont du site, les suivis manuels ont été très intenses avec énormément de temps sur place, notamment de nuit, et avec de nombreux opérateurs. Sur $n=17$ smolts radio-pistés, $n=15$ ont pu être pistés complètement et ont pu fournir des données sur le comportement de dévalaison et le choix de la voie de passage. Afin d'améliorer le suivi, il serait utile de combiner les antennes manuelles à des stations d'écoute automatique à proximité de chaque voie de passage ainsi qu'aux barrages en aval. Si cela est effectué, une étude avec un plus grand effectif serait dès lors possible.

En ce qui concerne le suivi par la méthode RFID, sur les 5 voies de passage potentielles, seuls 2 antennes ont pu être installées, une en amont de la vis d'Archimède et l'autre en amont de la nouvelle échancrure. Ce dispositif complémentaire à la radio-télémétrie, a été très utile dans le cadre de cette étude, notamment par une augmentation du nombre d'individus suivis. Cependant, ce nombre d'antennes n'a pas permis de différencier les smolts passés par le barrage ou par les turbines Kaplan. Pour la poursuite des investigations, il serait intéressant d'installer des antennes au niveau de toutes les voies de passages potentielles ou du moins au niveau des turbines Kaplan. L'idéal serait même de combiner des antennes en amont et en aval des voies de passage pour définir des efficacités en fonction des taux d'approche.

Pour l'effet du marquage sur le comportement de dévalaison des smolts, afin de respecter un rapport poids de l'émetteur/poids du smolt inférieur à 2%, nous avons sélectionné des individus dont la taille et le poids étaient plus élevés que les smolts qui dévalent naturellement. Aucun ne semble avoir été affecté par la chirurgie car ils ont tous entamé leur migration très rapidement après le marquage et aucun comportement aberrant n'a été observé. Nous bénéficions de l'expertise de l'équipe en matière de marquage et nous avons utilisé des méthodes acceptées dans la littérature (Ovidio et al., 2017).

4.2. Comportement en amont du barrage de Méry

4.2.1. Comportement d'approche et choix d'une voie de passage

En arrivant à hauteur d'une centrale hydro-électrique, les smolts sont capables de détecter les fluctuations du courant à l'entrée des différentes voies de passage (Coutant & Whitney, 2000). Contrairement à Nyqvist et al. (2016), dans notre étude, peu de smolts ont effectué des remontées avant de franchir le barrage. La plupart des smolts ($n=10$) se sont rapidement positionnés à proximité de la voie de passage qui a été finalement empruntée. D'autres ($n=6$) ont par contre approché plusieurs voies de passage potentielles, avant d'en choisir une définitivement. Les smolts ont pu prendre connaissance de leur environnement et choisir la voie qu'ils leur paraissaient la plus sûre (Svendsen et al., 2011).

Les zones de concentrations à proximité des voies de passage ont permis de mettre en évidence les endroits qui sont attractifs, avec le choix de la voie. À partir de ces cartes, nous avons pu mettre en avant l'attractivité assez élevée de l'exutoire de dévalaison et le faible attrait de la vis d'Archimède.

La configuration hydraulique du site pourrait avoir un effet sur le déplacement et le comportement des smolts (Larinier et Travade, 1998). Il est possible qu'en arrivant à hauteur du site, les smolts suivent naturellement le débit principal, longent le barrage et atteignent le canal de prise d'eau des turbines Kaplan comme plusieurs auteurs l'ont déjà suggéré (Brevé et al., 2014 & Scruton et al., 2007). La faible attractivité de la vis d'Archimède peut probablement être liée à sa position par rapport à l'hydraulique du site. Lors d'une étude de télémétrie, Havn et al. (2017) ont montré une grande attractivité d'une vis d'Archimède suite à l'hydraulique du site d'étude. À hauteur du barrage, la majorité du débit de la rivière se dirige vers les turbines Francis et la vis d'Archimède. Dans le cadre de notre étude, nous avons pu mettre en évidence l'influence du débit de l'Ourthe sur le comportement de recherche des smolts. Lorsque le débit du cours d'eau est élevé, ils se déplacent généralement vers le déversoir alors que si le débit est inférieur à $20\text{m}^3/\text{s}$, ils se dirigent naturellement vers le canal de prise d'eau étant donné le peu d'eau passant par le déversoir (Philippart et al., 2008).

La configuration des voies de passage influence également leur comportement. En ce qui concerne les turbines « fish-friendly », même si leur morphologie et leur fonctionnement n'engendrent ni blessures ni mortalité (Coutant & Whitney 2000), la vis d'Archimède à Méry n'est pas la voie de passage la plus utilisée. Il est possible, en plus de sa position non attractive hydrauliquement, que la vis soit répulsive de par le bruit et les vibrations qu'elle génère et qui pourraient dès lors effrayer et repousser les poissons. Actuellement, très peu d'études ont déjà été réalisées sur l'attraction des vis d'Archimède. Cependant, en ce qui concerne les anguilles, Piper et al. (2018) ont pu déjà mettre en évidence la faible attractivité de la vis d'Archimède aussi bien pour la montaison que la dévalaison.

En ce qui concerne l'exutoire de dévalaison, les smolts observables à l'œil nu se positionnaient principalement à proximité de l'exutoire. La présence de la lampe à mercure (Larinier et Boyer-Bernard, 1991) mais également la préférence des smolts à choisir une voie de passage avec un débit plus élevé à son entrée pourraient expliquer leur attrait pour l'exutoire de dévalaison comme déjà suggéré par plusieurs auteurs (Fjelstad et al., 2014 & Fjelstad et al., 2012 & Scruton et al., 2008). Dans le cadre de notre étude, la vitesse de courant à l'entrée de l'exutoire de 1,2 m/s est supérieure à celle à l'entrée des turbines Kaplan de 0,8m/s (Dierckx et al., 2017). Cependant, même s'ils sont attirés par cette voie, les smolts sont restés positionnés en rhéotaxie positive en résistance au courant, indiquant la perception d'un danger notamment une augmentation de la turbulence ou de la vitesse de courant (Haro et al., 1998 & Davidsen et al., 2005 & Ovidio et al., 2017). Comme a pu le remarquer Haro et al. (1998), les smolts se sont rassemblés progressivement en un petit groupe avant de se faire emporter par la prise d'eau de l'exutoire ou des turbines Kaplan. Par ailleurs, notre étude a montré que la totalité des smolts radio-marqués, localisés dans le canal de prise d'eau, ont emprunté les turbines Kaplan ou l'exutoire de dévalaison. Sur l'ensemble des smolts suivis, presque la moitié des smolts radio-marqués (41%) et RFID-marqués (45%) ont franchi le site de Méry en empruntant l'exutoire de dévalaison. Si on compare les résultats obtenus pour ces deux voies de passage, sur les 11 smolts radio-marqué présents dans le canal d'amenée, 7 ont effectivement emprunté l'exutoire de dévalaison, obtenant une efficacité corrigée (selon Ovidio et al., 2017) de 64%. Nos résultats sont dans la gamme inférieure en comparaison avec les résultats de la littérature qui indique des efficacités globales d'exutoire de dévalaison entre 51% et 89% (Nygqvist et al., 2016 & Scruton et al., 2007 & Tomanova et al., 2017 & 2018 & Havn et al., 2018). Ce pourcentage moins élevé par rapport à la littérature pourrait être expliqué par la présence d'autres voies de passage disponibles et par le fait que la grille n'est pas optimale (pas d'inclinaison, vitesse élevée, espace important entre les barreaux). Sur les 11 smolts radio-marqués, 4 ont tout de même été emportés par la prise d'eau des turbines, car l'espacement entre les barreaux s'avère trop grand (5cm) par rapport à ce qui est préconisé (-2cm) (Tomanova et al., 2018). Tomanova et al. (2018) ont montré un passage moyen des smolts par les turbines de 13,3%, et l'utilisation des turbines Kaplan pour les smolts radio-pistés dans le cadre de notre étude est de 17%. Pour la technique RFID, les smolts empruntant les turbines Kaplan et le déversoir (48%) ne sont pas identifiables. Cependant, si on se base sur les données obtenues en télémétrie radio sur l'utilisation des turbines Kaplan (17%) et du déversoir (17%), sur les 48% des smolts RFID, on peut supposer que la moitié aurait emprunté les turbines Kaplan. Même si ces turbines ont un taux de mortalité théorique pouvant atteindre 20% (Larinier et Travade, 2002), les smolts radio-marqués passés par cette voie semblent avoir survécu et poursuivi leur dévalaison, du moins pendant la durée du suivi. Cependant, il n'est pas impossible que certains aient subi des dommages corporels et/ou une mortalité indirecte sur

le long terme (Brevé et al., 2014 & Larinier et Travade, 2002). En absence de l'exutoire à Méry, le nombre de smolts qui emprunte les turbines Kaplan augmenterait inévitablement et pourrait atteindre un pourcentage d'utilisation entre 60 et 70%. Dans la littérature, le pourcentage d'utilisation des turbines peut aller au-delà de 70% (Fjelstad et al., 2014 & Thorstad et al., 2017). L'exutoire a dès lors un grand intérêt pour la dévalaison des smolts sur le site de Méry. Cependant, les données présentes dans la littérature montrent que l'efficacité de l'exutoire de dévalaison pourrait être encore augmentée en améliorant notamment la morphologie de la grille qui est associée. En effet, Tomanova et al. (2018) ont démontré la grande efficacité de l'exutoire de dévalaison d'en moyenne 86,5% lorsque l'inclinaison des grilles était de 26° par rapport à l'horizontale et lorsque l'espacement des barreaux est de 20mm.

Etant donné le faible débit associé aux voies restantes telles que le déversoir et les voies naturelles, celles-ci sont peu utilisées (Havn et al., 2017 & Brevé et al., 2014 & Thorstad et al., 2017). Seulement 17% des smolts radio-marqués et potentiellement 24% des smolts RFID ont emprunté le déversoir alors que c'est la voie la plus naturelle. Le pourcentage d'utilisation du barrage a légèrement diminué passant de 33% en 2008 à 24% et 17% en 2018 (Philippart et al., 2008). Par contre, la nouvelle échancrure sur le barrage a été très peu utilisée avec uniquement 6% des smolts RFID. En ce qui concerne la vis d'Archimède, seuls 12% des smolts radio-marqués et 1% des smolts RFID-marqués ont emprunté cette voie contre 43% des smolts lors de l'étude de Havn et al. (2017).

4.2.2. Délai de franchissement du barrage de Méry

Dans le cadre de cette étude, les smolts ont eu besoin en moyenne de 4h22 pour franchir le barrage de Méry et au total, 75% l'ont franchi en moins de 4h. Sur les 25% restant 2 smolts ont pris plus de 20h pour franchir le barrage. Dans l'étude de Tomanova et al. (2018), 75% des smolts ont franchi le barrage en moins de 2h15. Dans la littérature, le temps moyen nécessaire pour franchir un barrage varie entre moins d'1h et plus de 22h (Ovidio et al., 2017 & Havn et al., 2017) et principalement endéans les 10h (Scruton et al., 2007 & Castro-Santos et Perry, 2012 & Thorstad et al., 2017 & Havn et al., 2018). Nous n'avons pas observé de différence statistique du délai de franchissement suivant les voies de passage empruntées, même si les smolts semblent avoir nécessité en moyenne moins de temps pour franchir l'exutoire de dévalaison et les turbines Kaplan (respectivement 1h29 et 2h31) que le déversoir ou la vis d'Archimède (respectivement 7h01 et 11h52). Dans la littérature, certains suggèrent que le délai de franchissement associé à l'exutoire de dévalaison est supérieur à celui associé au déversoir et aux turbines (Fjelstad et al., 2012) et d'autres ont observé l'inverse avec en moyenne 24h pour l'exutoire, 58h pour les turbines dont la différence est significative et 29h pour le barrage (Scruton et al., 2007). Pour Havn et al. (2017), le délai de

franchissement associé à la vis d'Archimède s'avère être moins élevé que pour les autres voies avec un temps moyen de 5-6h contrairement à notre étude où le délai de franchissement était de 11h52. La configuration des sites d'étude (Scruton et al., 2003) et la progression de la période de dévalaison (Ovidio et al., 2017) et donc l'état de smoltification pourraient expliquer la grande variabilité des résultats obtenus.

De manière isolée, les retards engendrés au niveau du barrage de Méry peuvent sembler non problématiques. Cependant, une fois ce barrage franchi, les smolts doivent encore surmonter 5 autres barrages avant d'arriver dans la Meuse accentuant le retard cumulé (Coutant et Whitney 2000 & Steinbach, 2001). De plus, une fois arrivé à la confluence, ils devront franchir les nombreux barrages de la Meuse dont celui à Monsin (Dierckx et al., 2017). Le bief « barrage Monsin-canal Albert » pose constamment problème lors de la dévalaison des smolts étant donné l'absence de voies de passage possibles au niveau de ce barrage exceptés les turbines Kaplan et l'absence d'issues au niveau du canal Albert. À hauteur de ce complexe, les smolts expriment à plusieurs reprises des signes d'hésitation avec des remontées très fréquentes et parfois sur de grandes distances (Ovidio et al., 2016). La voie alternative qui est dès lors préférentiellement choisie est le canal Albert en amont du barrage. En 2014, aucun smolt suivi à l'aide de la télémétrie acoustique n'a franchi le barrage de Monsin (Ovidio et al., 2015). En 2015, certains ont réussi à le franchir par les turbines et ont pu poursuivre leur dévalaison par la bonne voie (Ovidio et al., 2016). Ce bief barrage Monsin-canal Albert empêche généralement la bonne poursuite de la dévalaison générant un retard très important et un épuisement régulier des smolts, surtout si les conditions de débit sont faibles.

4.2.3. Influence du débit de l'eau sur le choix d'une voie de passage

La répartition du débit de la rivière entre les différentes voies de passage en amont de l'ouvrage hydro-électrique a inévitablement un effet sur le choix d'une voie (Serrano et al., 2009 et Thorstad et al., 2017 & Fjelstad et al., 2012). Dans le cadre de notre étude, nous avons confirmé cette hypothèse car on distingue un effet du débit sur le choix de l'exutoire de dévalaison ou du déversoir comme voie de passage. L'utilisation du déversoir est associée à un débit de la rivière élevé alors que l'exutoire de dévalaison à un faible de débit. Lorsque celui-ci atteint les $20\text{m}^3/\text{s}$, il n'y a plus assez d'eau passant par le déversoir et les smolts vont avoir tendance à se diriger vers le canal de prise d'eau des turbines Kaplan. On observe dès lors une augmentation de l'utilisation de l'exutoire de dévalaison par les smolts radio- et RFID-marqués. Lors du 1^{er} déversement, le débit était de $37,2\text{m}^3/\text{s}$, et le taux de passage par l'exutoire a été le plus bas et le passage par le déversoir le plus élevé. Ensuite, progressivement, l'utilisation du déversoir diminue et celle des turbines Kaplan augmente pour les smolts radio-marqués avec la diminution progressive du débit.

4.2.4. Influence de la taille sur le choix d'une voie

Comme Thorstad et al. (2017), la taille des smolts n'a pas eu d'effet significatif sur le comportement de recherche et le choix d'une voie de passage. Pour les smolts radio-marqués, on peut tout de même observer une certaine tendance des individus de plus grande taille à se diriger vers le canal de prise d'eau des turbines, alors que les autres se déplacent vers le déversoir et la vis d'Archimède. Pour les smolts radio-marqués, ce résultat peut être simplement expliqué par le fait que l'exutoire de dévalaison et les turbines Kaplan ont plutôt été utilisés par les smolts en fin de dévalaison. Ils étaient naturellement de plus grandes tailles et comme le débit de l'Ourthe à Méry était faible, ils se sont dirigés vers le canal de prise d'eau des turbines.

4.3. Patterns de migration

4.3.1. Rythme journalier de migration

Nous avons mis en évidence que 56% des smolts ($n=14/25$) ont franchi le site de Méry en fin de journée entre 16h40 et 18h30 contre 36% au crépuscule ($n=9/25$) et 8% pendant la nuit ($n=2/25$). Plus on se situe tard dans la saison de migration et plus on observe un avancement progressif de la période de franchissement du site pour, *in fine*, un passage uniquement avant le crépuscule lors du dernier déversement. Ces résultats coïncident peu avec la littérature qui met en avant la tendance à franchir plus fréquemment et plus rapidement un barrage au crépuscule et pendant la nuit lorsque leur comportement de recherche est le plus important (Larinier et Boyer-Bernard, 1991 & Holbrook et Kinisson, 2011 & Fjelstad et al., 2012 & Scruton et al., 2008 & Ovidio et al., 2017).

En ce qui concerne l'initiation de la dévalaison, elle a eu lieu en moyenne le jour à 17h46. On pourrait supposer qu'avec la progression de la dévalaison, les smolts auraient tendance à aussi bien dévaler en journée que pendant la nuit comme l'ont suggéré plusieurs auteurs (Moore et al., 1995 & Ibbotson et al., 2006 & McCormick et al., 1998). Cependant, si on se base sur les résultats obtenus grâce au monitoring du piège de dévalaison, 3 des déversements ont eu lieu avant et pendant le pic de capture dans le piège. Seul le dernier déversement a eu lieu en fin de période de dévalaison. Brevé et al. (2014) ont pu observer lors de leur étude, la légère préférence des smolts présents dans la Meuse à migrer la journée. La température de l'eau pourrait potentiellement expliquer ce comportement (McCormick et al., 1998 & Riley et al., 2014). Lorsque la température de l'eau est supérieure à 12°C, et c'est le cas pour les 3 derniers déversements, les smolts vont migrer aussi bien en journée que pendant la nuit (Ibbotson et al., 2006). Il faut tout de même rester prudent dans

l'interprétation de ces résultats étant donné que nos smolts ont été élevés en captivité et qu'ils n'ont pas tous été déversés exactement à la même période de la journée.

4.3.2. Vitesse de progression des smolts en aval du barrage de Méry

Lorsque l'on compare les vitesses de migration ($v = 0,39, 0,66, 0,40$ et $0,31\text{m/s}$) obtenues dans les différents biefs, on observe une grande variabilité sur l'ensemble du trajet des smolts du point de déversement en amont de Méry vers la confluence de l'Ourthe avec la Meuse. Ces différences significatives entre le 1^{er}/3^{ème} biefs et le 2^{ème} tronçon pourraient être expliquées par la présence d'arrêts intentionnels des smolts tout au long du cours d'eau (Newton et al., 2018). La faible vitesse de courant dans certains biefs de la rivière, accentuée par l'installation de barrages, nous permettrait également d'expliquer la diminution de la vitesse de migration. Une vitesse de l'eau plus élevée favorise et accélère la dévalaison des smolts car leur vitesse est généralement légèrement supérieure à celle du courant (Thorstad et al., 2004 & 2012 & Davidsen et al., 2005 & 2009 & Fängstam 1993). C'est pourquoi dans le cadre de notre étude, dans certains segments de la rivière, on observe un ralentissement de la plupart des smolts comme notamment à 1000m du barrage de Colonster, dans le bief entre le point de déversement et le barrage de Méry et dans le bief entre le barrage de Colonster et de Campana. La faible vitesse de courant ne favorise pas l'orientation des smolts et entraîne une diminution de la vitesse de migration (Coutant & Whitney 2000).

Par ailleurs, les smolts ont dévalé l'Ourthe à une vitesse moyenne de migration de $0,25\text{m/s}$ en prenant en considération les retards et la progression entre les biefs. Dans la littérature, des vitesses moyennes sont variables et fluctuent entre $0,07\text{m/s}$, $0,3\text{m/s}$ et jusqu'à $0,69\text{m/s}$ en milieu artificiel contrôlé (Aarestrup, Nielsen et Koed, 2002 & Riley, 2007 & Davidsen et al., 2009 & Martin et al., 2012). Newton et al. (2018) ont mis en évidence une vitesse de progression très faible de $0,025$ à $0,19\text{ m/s}$ dans une rivière non impactée par des obstacles. Dans le cadre de notre étude, la vitesse de progression moyenne calculée semble être dans la moyenne supérieure pour une rivière impactée par des barrages par rapport aux données présentes dans la littérature. Contrairement à Havn et al. (2017) qui ont observé une influence de la voie de passage empruntée sur la vitesse de progression ultérieure des smolts avec une vitesse de migration plus élevée après le passage par la vis d'Archimède, notre étude n'a montré aucune influence de la voie de passage empruntée à Méry sur la vitesse de progression. Comme pour Havn et al. (2018), la taille n'aurait également aucune influence sur la vitesse de progression. En comparant ensuite la vitesse moyenne avec les vitesses de migration dans les différents biefs, on remarque des différences. Même si Newton et al. (2018) n'ont montré aucune différence significative de la vitesse de migration entre rivières non impactées et impactées par des obstacles, dans le cadre de notre étude, la présence de plusieurs barrages le long de l'Ourthe est clairement une cause de la diminution

de la vitesse de progression. Le barrage de Méry ralentit la progression des smolts d'en moyenne 4h22 et celui de Tilff quant à lui augmente le temps de parcours d'en moyenne 1min35. En ce qui concerne les 4 barrages qui suivent, leur délai de franchissement n'a pas pu être déterminé. À partir des données obtenues pour Méry et Tilff, étant donné leur typologie semblable, les barrages de Colonster et de Streupas nécessiteraient un délai de franchissement probablement similaire à celui du barrage de Tilff. Pour les barrages de Campana et des Grosses Battes, leur délai de franchissement se rapprocherait davantage à celui de Méry. On pourrait dès lors supposer que sur les 6 barrages présents en basse Ourthe, 3 pourraient avoir un effet significatif sur le timing migratoire des smolts.

4.4. Monitoring du piège de l'exutoire de dévalaison

Même si les conditions printanières varient d'année en année, 2018 ne représente pas une année exceptionnelle en termes de conditions hydrauliques de la rivière et de captures de smolts par rapport aux années précédentes. Les valeurs de température et de débit de l'eau pour les percentiles 10, 50 et 90 vont dépendre des conditions printanières. La température de l'eau lors des captures (1^{ère} et dernière capture et le percentile 10 et 90) était généralement similaire aux valeurs historiques. Pour le percentile 50, en 2018, la température de capture était par contre supérieure de 3°C par rapport à la valeur moyenne obtenue précédemment. Le débit de l'eau a quant à lui été très variable en 2018. Seul le débit associé au percentile 10 de capture est similaire au débit moyen des années précédentes. Pour le percentile 50, 90 de capture et la dernière capture, les débits étaient inférieurs par rapport aux valeurs moyennes des autres années. Pour le percentile 50, une température élevée et un faible débit associés pourraient expliquer la présence du pic de capture.

Après 10 ans de contrôle du piège de l'exutoire de dévalaison, nous avons pu mettre en évidence les facteurs influençant le pattern de dévalaison (son initiation, le P10, P50, P90 et son achèvement) et la capture des smolts dans le piège. La température du cours d'eau influence plutôt le pattern de dévalaison comme Fjelstad et al. (2012), Zydlewski, Haro et McCormick (2005) & McCormick et al. (1998) l'ont suggéré et le débit de l'eau, plutôt l'utilisation des différentes voies de passage. Le nombre de smolts semi-sauvages dévalant la rivière et du nombre de smolts déversés influencent également le nombre de capture. D'après les résultats de radio-télémetrie, la température n'aurait en revanche pas d'influence sur le choix d'une voie de passage.

À partir des données présentes dans la littérature, la dévalaison est amorcée lorsque la température varie entre 5°C et 15°C (McCormick et al., 1998 & Whalen et al., 1999 & Dolotov, 2006 & Otero et al., 2014) avec un pic de dévalaison dans les alentours des 10°C (Martin et al., 2012 et Diercks et al., 2017). La dévalaison dans l'Ourthe a pu dès lors être

amorcée dans les alentours du 26 mars à une température de 7-8°C avec un pic de dévalaison le 8 avril lorsque la température atteint les 10-11°C. La diminution rapide de smolts capturés dans le piège après le pic de capture le 23 avril et l'augmentation de la température supérieure à 14°C pourraient potentiellement expliquer la fin de la période de dévalaison vers début mai (Martin et al., 2012).

Si en deçà des 20m³/s, l'entraînement forcé des poissons dans le canal de prise d'eau vers les turbines et vers l'exutoire de dévalaison est très favorable (Dierckx et al., 2017), on pourrait supposer que la quasi-totalité des smolts dévalant entre le 23 avril et le 29 avril auraient pénétré le canal d'amenée. Si l'efficacité corrigée de l'exutoire de dévalaison est de 64%, on peut estimer que n=2177 smolts auraient potentiellement pénétré le canal d'amenée et n=1393 ont effectivement emprunté l'exutoire de dévalaison. Par ailleurs, la diminution de l'utilisation de l'exutoire de dévalaison avec l'augmentation du débit, supérieur à 20m³/s, peut être interprété par la préférence des smolts pour le déversoir.

5. Conclusions et perspectives

En conclusion, cette étude préliminaire a permis d'analyser et de mettre en évidence le comportement de dévalaison de smolts en amont du barrage de Méry et le long de la basse Ourthe en amont de la confluence avec la Meuse. La période de dévalaison de 2018, dont les conditions environnementales n'étaient pas exceptionnelles, a débuté fin mars et s'est terminée début mai. En arrivant à hauteur du barrage de Méry, les smolts se sont généralement positionnés et concentrés aux alentours de la voie de passage qu'ils ont empruntée, indiquant ainsi un certain attrait du site et peu de comportement fin de recherche. Cette expérimentation a mis aussi en évidence l'importance de l'exutoire de dévalaison installé à proximité des turbines Kaplan sur le site hydro-électrique lors de la dévalaison des smolts de saumon atlantique. En effet, la zone la plus fréquentée a été celle proche de l'exutoire. Etant donné la typologie du site, les smolts se sont principalement dirigés vers le canal de prise d'eau des turbines Kaplan lors d'une diminution du débit de l'Ourthe. Une fois le canal de prise d'eau pénétré, la majorité des smolts ont emprunté l'exutoire de dévalaison. Contrairement à cette voie, la vis d'Archimède s'avère être très peu attractive et très peu utilisée par les smolts malgré son caractère ichtyo-compatible. Le franchissement du barrage de Méry a généralement eu lieu en fin de journée et avant le début du crépuscule. Etant donné le délai de franchissement relativement faible, le barrage de Méry semblerait ne pas engendrer seul de retard conséquent sur la progression de la migration des smolts. Ensuite, la vitesse de progression des smolts a été influencée par la présence de barrages tout au long de l'Ourthe, par leurs arrêts intentionnels ou forcés mais également par une vitesse de courant variable suivant les biefs entre les obstacles. Ces barrages présents en basse Ourthe pourraient avoir un impact cumulé sur la progression des smolts.

La méthode utilisée lors de notre d'étude à Méry nécessiterait quelques améliorations afin de pouvoir poursuivre les investigations avec un effectif plus important et ainsi augmenter la précision de nos résultats. Il serait également intéressant de réaliser une étude se focalisant principalement sur l'attractivité de la vis d'Archimède de Méry dans le but d'améliorer son attractivité et son efficacité. Ensuite, cette étude comportementale pourrait également être étendue sur plusieurs autres barrages présents notamment en aval de Méry dans le but d'analyser leur impact cumulé sur la progression de la migration. Enfin, envisager d'autres recherches au niveau de barrages présents sur des rivières différentes serait souhaitable afin de mettre en évidence les aménagements encore à effectuer et ainsi permettre le retour du saumon atlantique dans de bonnes conditions.

« La détermination d'aujourd'hui mène au succès de demain »

6. Bibliographie

- Aarestrup, K., Nielsen, C., & Koed, A. (2002). Net ground speed of downstream migrating radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and brown trout (*Salmo trutta* L.) smolts in relation to environmental factors. *Hydrobiologia*, 483(13), 95-102.
- Admiraal, W., Van der Velde, G., Smit, H., & Cazemier, W. G. (1993). The rivers Rhine and Meuse in the Netherlands: present state and signs of ecological recovery. *Hydrobiologia*, 265(1-3), 97-128.
- Ardenne. (1998). *L'Ardenne*. Retrieved from <http://www.ardenne.org/ardenne>.
- Armstrong, J. D., Grant, J. W., Forsgren, H. L., Fausch, K. D., DeGraaf, R. M., Fleming, I. A., ... & Schlosser, I. J. (1998). The application of science to the management of Atlantic salmon (*Salmo salar*): integration across scales. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(S1), 303-311.
- Baglinière, J. L., Thibault, M., & Dumas, J. (1990). Réintroductions et soutiens de populations du Saumon atlantique (*Salmo salar* L.) en France. *Revue d'écologie*, 45(S5), 299-324.
- Baras, E., & Lucas, M. C. (2001). Impacts of man's modifications of river hydrology on the migration of freshwater fishes: a mechanistic perspective. *International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology*, 1(3), 291-304.
- Bardonnet, A., & Baglinière, J. L. (2000). Freshwater habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(2), 497-506.
- Beall, E., Dumas, J., Claireaux, D., Barriere, L., & Marty, C. (1994). Dispersal patterns and survival of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) juveniles in a nursery stream. *ICES Journal of Marine Science*, 51(1), 1-9.
- Benitez, J. P., Dierckx, A., Nzau Matondo, B., Bunel, S., Spronck, C., & Ovidio, M. (2015). *Évaluation scientifique de l'efficacité d'un dispositif de monitoring de la dévalaison des poissons sur un site hydroélectrique de la zone à ombre de l'Amblève*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Benitez, J. P., Dierckx, A., Rimbaud, G., Sonny, D., Watthez, Q., Roy, R., & Ovidio, M. (2016). *Vérification de l'attractivité et de l'efficacité de la passe à poissons du barrage du Maka sur le Bocq (Yvoir). Etude comportementale par biotélémetrie*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Boeuf G. (1993) Salmonid smolting: a pre-adaptation to the oceanic environment. In Rankin J.C. & Jensen F.B. (Eds), *Fish and Fisheries: Vol. 9 Fish Ecophysiology* (pp. 105-135).
- Boisclair, D. (2004). The status of Atlantic salmon (*Salmo salar*): populations and habitats. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61(12), 2267-2270.
- Brevé, N., Vis, H., Spierts, I., de Laak, G., Moquette, F., & Breukelaar, A. (2014). Exorbitant mortality of hatchery-reared Atlantic salmon smolts (*Salmo salar* L.), in the Meuse river system in the Netherlands. *Journal of Coastal Conservation*, 18(2), 97-109.

- Brookes, A. (1988). *Channelized rivers: perspectives for environmental management* (Vol. 659). Chichester: Wiley.
- Brown, R. S., Pflugrath, B. D., Colotelo, A. H., Brauner, C. J., Carlson, T. J., Deng, Z. D., & Seaburg, A. G. (2012). Pathways of barotrauma in juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage: Boyle's law vs. Henry's law. *Fisheries Research*, 121, 43-50.
- Calles, O., Karlsson, S., Hebrand, M., & Comoglio, C. (2012). Evaluating technical improvements for downstream migrating diadromous fish at a hydroelectric plant. *Ecological Engineering*, 48, 30-37.
- Castro-Santos, T., & Perry, R. W. (2012). Time-to-event analysis as a framework for quantifying fish passage performance. In N.S. Adams, J.W. Beeman & J.H. Eiler (Eds.), *Telemetry techniques: a user guide for fisheries research* (pp. 427-452). Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.
- Cefas. (2012). *Assessment of damage to smolts caused by Archimedes screw hydropower turbines*. Lowestoft, UK : Potter, T. R. I., Davison, P. & Moore, A.
- Chanseau, M., Larinier, M., & Travade, F. (1999). Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le Gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radio-télémetrie. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (353-354), 99-120.
- Coutant, C. C., & Whitney, R. R. (2000). Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: A review. *Transactions of the American Fisheries Society*, 129(2), 351–380.
- Davaine, P., & Prouzet, P. (1994). La vie marine du saumon atlantique dans son aire géographique. In J. C. Guegen & P. Prouzet (Eds.), *Le saumon atlantique* (pp. 64-85). Brest, France : Ifremer.
- Davidson, J. G., Rikardsen, A. H., Halttunen, E., Thorstad, E. B., Økland, F., Letcher, B. H., ... & Næsje, T. F. (2009). Migratory behaviour and survival rates of wild northern Atlantic salmon (*Salmo salar*) post-smolts: effects of environmental factors. *Journal of Fish Biology*, 75(7), 1700-1718.
- Davidson, J., Svenning, M. A., Orell, P., Yoccoz, N., Dempson, J. B., Niemelä, E., ... & Erkinaro, J. (2005). Spatial and temporal migration of wild Atlantic salmon smolts determined from a video camera array in the sub-Arctic River Tana. *Fisheries Research*, 74(1-3), 210-222.
- Dierckx, A., Benitez, J. P., Philippart, J. C., Bernard, B., Mandiki, R., Evrard, A., ... & Ovidio, M. (2017). *Convention relative à la réhabilitation du Saumon atlantique dans le bassin de la Meuse*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Dill, P. A. (1977). Development of behaviour in alevins of Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Animal behaviour*, 25(1), 116-121.
- Dolotov, S. I. (2006). The effects of water temperature on the migration of smolts of the Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Journal of Ichthyology*, 46(2), 194-203.
- Duston, J., & Saunders, R. L. (1990). The entrainment role of photoperiod on hypoosmoregulatory and growth-related aspects of smolting in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Zoology*, 68(4), 707-715.

- ECOGEA (2010). *Test for evaluating the injuries suffered by downstream-migrating eels in their transiting through the new spherical discharge ring VLH turbogenerator unit installed on the Moselle river in Frouard*. Toulouse, France : Lagarrigue, T. & Frey, A.
- Enders, E. C., Smokorowski, K. E., Pennell, C. J., Clarke, K. D., Sellars, B., & Scruton, D. A. (2007). Habitat use and fish activity of landlocked Atlantic salmon and brook charr in a newly developed habitat compensation facility. *Hydrobiologia*, 582(1), 133-142.
- Fjeldstad, H. P., Alfredsen, K., & Boissy, T. (2014). Optimising Atlantic salmon smolt survival by use of hydropower simulation modelling in a regulated river. *Fisheries Management and Ecology*, 21(1), 22-31.
- Fjeldstad, H. P., Uglem, I., Diserud, O. H., Fiske, P., Forseth, T., Kvingedal, E., ... & Järnegren, J. (2012). A concept for improving Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt migration past hydro power intakes. *Journal of Fish Biology*, 81(2), 642-663.
- Fry, F. E. J. (1971). The effect of environmental factors on the physiology of fish. In W.S. Hoar, D.J. Randall, *Fish Physiology : Vol. 6 Environmental Relations and Behavior* (pp. 1-98).
- Fu, T., Deng, Z. D., Duncan, J. P., Zhou, D., Carlson, T. J., Johnson, G. E., & Hou, H. (2016). Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device. *Renewable Energy*, 99, 1244–1252.
- Glass, C. (2010). *An Evaluation of the Reintroduction of Atlantic Salmon to Lake Ontario and its Tributaries* (Master's thesis). University of Waterloo, Waterloo.
- Hansen, L. P., Døsving, K. B., & Jonsson, B. (1987). Migration of farmed adult Atlantic salmon with and without olfactory sense, released on the Norwegian coast. *Journal of Fish Biology*, 30(6), 713-721.
- Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., & Castro-Santos, T. (1998). Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses. *Transactions of the American Fisheries Society*, 127(1), 118-127.
- Havn, T. B., Thorstad, E. B., Teichert, M. A. K., Sæther, S. A., Heermann, L., Hedger, R. D., ... & Økland, F. (2018). Hydropower-related mortality and behaviour of Atlantic salmon smolts in the River Sieg, a German tributary to the Rhine. *Hydrobiologia*, 805(1), 273–290.
- Havn, T. B., Sæther, S. A., Thorstad, E. B., Teichert, M. A. K., Heermann, L., Diserud, O. H., ... & Økland, F. (2017). Downstream migration of Atlantic salmon smolts past a low head hydropower station equipped with Archimedes screw and Francis turbines. *Ecological Engineering*, 105, 262–275.
- Heggenes, J. (1990). Habitat utilization and preferences in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in streams. *Regulated Rivers: Research & Management*, 5(4), 341-354.
- Heland, M., & Dumas, J. (1994). Ecologie et comportement des juvéniles. In J. C. Guegen & P. Prouzet (Eds.), *Le saumon atlantique* (pp. 29-46). Brest, France : Ifremer.
- Hocutt, C. H., & Edinger, J. E. (1980). Fish behavior in flow fields. In C. H. Hocutt, J. R. Stauffer, J. E. Edinger, ... [et al.] (Eds.), *Power plants: effects on fish and shellfish behavior* (pp. 143-182). New-York : Academic Press.

- Hogan, T. W., Cada, G. F., & Amaral, S. V. (2014). The Status of Environmentally Enhanced Hydropower Turbines. *Fisheries*, 39(4), 164–172.
- Holbrook, C. M., Kinnison, M. T., & Zydlewski, J. (2011). Survival of migrating Atlantic salmon smolts through the Penobscot River, Maine: A prere Restoration assessment. *Transactions of the American Fisheries Society*, 140(5), 1255–1268.
- Ibbotson, A. T., Beaumont, W. R. C., Pinder, A., Welton, S., & Ladle, M. (2006). Diel migration patterns of Atlantic salmon smolts with particular reference to the absence of crepuscular migration. *Ecology of Freshwater Fish*, 15(4), 544-551.
- Järvi, T. (1989). Synergistic effect on mortality in Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolt caused by osmotic stress and presence of predators. *Environmental Biology of Fishes*, 26(2), 149-152.
- Jonsson, N. (1991). Influence of water flow, water temperature and light on fish migration in rivers. *Nordic journal of freshwater research*, 66(1991), 20-35.
- Jonsson, B., & Ruud-Hansen, J. (1985). Water temperature as the primary influence on timing of seaward migrations of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42(3), 593-595.
- Katopodis, C., & Williams, J. G. (2012). The development of fish passage research in a historical context. *Ecological Engineering*, 48, 8–18.
- Kavlock, R. J., Daston, G. P., DeRosa, C., Fenner-Crisp, P., Gray, L. E., Kaattari, S., ... & Miller, R. (1996). Research needs for the risk assessment of health and environmental effects of endocrine disruptors: a report of the US EPA-sponsored workshop. *Environmental health perspectives*, 104(4), 715.
- Kemp, P. S. (2015). Impoundments, barriers and abstractions: Impact on fishes and fisheries, mitigation and future directions. *Freshwater Fisheries Ecology*, 717–769.
- Klemetsen, A., Amundsen, P. A., Dempson, J. B., Jonsson, B., Jonsson, N., O'connell, M. F., & Mortensen, E. (2003). Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), brown trout (*Salmo trutta* L.) and Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of freshwater fish*, 12(1), 1-59.
- Koed, A., Jepsen, N., Aarestrup, K., & Nielsen, C. (2002). Initial mortality of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts following release downstream of a hydropower station. *Hydrobiologia*, 483(1-3), 31-37.
- Larinier, M. (2001). Environmental issues, dams and fish migration. In M. Gerd (Ed), *FAO fisheries technical paper: Vol. 419 Dams, Fish and Fisheries: Opportunities, challenges and conflict resolution* (pp. 45-89).
- Larinier, M. (2008). Fish passage experience at small-scale hydro-electric power plants in France. *Hydrobiologia*, 609(1), 97–108.
- Larinier, M., & Boyer-Bernard, S. (1991). La dévalaison des smolts de Saumon atlantique au barrage de Poutès sur l'Allier (43): utilisation de lampes à vapeur de mercure en vue d'optimiser

- l'efficacité de l'exutoire de dévalaison. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (323), 129-148.
- Larinier, M., & Travade, F. (1998). Petits aménagements hydroélectriques et libre circulation des poissons migrateurs. *La Houille Blanche*, (8), 46-51.
- Larinier, M., & Travade, F. (2002). Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (364), 181-207.
- Lawrence, E. R., Kuparinen, A., & Hutchings, J. A. (2016). Influence of dams on population persistence in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Zoology*, 94(5), 329–338.
- MacCrimmon, H. R., & Gots, B. L. (1979). World distribution of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 36(4), 422-457.
- Malbrouck, C., Micha, J. C., & Philippart, J. C. (2007). *La réintroduction du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse: synthèse et résultats*. Unpublished document.
- Marschall, E. A., Mather, M. E., Parrish, D. L., Allison, G. W., & McMenemy, J. R. (2011). Migration delays caused by anthropogenic barriers: Modeling dams, temperature, and success of migrating salmon smolts. *Ecological Applications*, 21(8), 3014–3031.
- Martin, P., Rancon, J., Segura, G., Laffont, J., Boeuf, G., & Dufour, S. (2012). Experimental study of the influence of photoperiod and temperature on the swimming behaviour of hatchery-reared Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts. *Aquaculture*, 362, 200-208.
- McCormick, S. D., Hansen, L. P., Quinn, T. P., & Saunders, R. L. (1998). Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(1), 77-92.
- McCormick, S. D., & Saunders, R. L. (1987). Preparatory physiological adaptations for marine life of salmonids: osmoregulation, growth, and metabolism. *American Fisheries Society Symposium*, 1(21), 1-229.
- Mills, D. (Ed.). (1989). *Ecology and management of Atlantic salmon*. London : Chapman and Hall.
- Moir, H. J., Soulsby, C., & Youngson, A. (1998). Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by Atlantic salmon for spawning in the Girnock Burn, Scotland. *Fisheries Management and Ecology*, 5(3), 241-254.
- Monnerjahn, U. (2011). Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) re-introduction in Germany: a status report on national programmes and activities. *Journal of Applied Ichthyology*, 27, 33-40.
- Moore, A., Potter, E. C. E., Milner, N. J., & Bamber, S. (1995). The migratory behaviour of wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts in the estuary of the River Conwy, North Wales. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52(9), 1923-1935.
- Niemelä, E., Erkinaro, J., Julkunen, M., Hassinen, E., Lämsmä, M., & Brørs, S. (2006). Temporal variation in abundance, return rate and life histories of previously spawned Atlantic salmon in a large subarctic river. *Journal of Fish Biology*, 68(4), 1222-1240.

- Newton, M., Barry, J., Dodd, J. A., Lucas, M. C., Boylan, P., Adams, C. E. (2018). A test of the cumulative effect of river weirs on downstream migration success, speed and mortality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts: An empirical study. *Ecology of Freshwater Fish*, 1-11.
- Nygqvist, D., Greenberg, L. A., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Ardren, W. R., & Castro-Santos, T. (2016). Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecology of Freshwater Fish*, 26(4), 707–718.
- Økland, F., Teichert, M. A., Thorstad, E. B., Havn, T. B., Heermann, L., Sæther, S. A., ... & Borchert, J. (2016). *Downstream migration of Atlantic salmon smolt at three German hydropower stations*. Report, University of Cologne, Cologne.
- ONEMA (2014). *Les enjeux de la dévalaison et les techniques d'atténuation disponibles*. France : Burgun, V.
- Otero, J., L'Abée-Lund, J. H., Castro-Santos, T., Leonardsson, K., Storvik, G. O., Jonsson, B., ... & Dionne, M. (2014). Basin-scale phenology and effects of climate variability on global timing of initial seaward migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Global Change Biology*, 20(1), 61-75.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Benitez, J. P., Nzau Matondo, B., Philippart, J. C., Bernard, B., ... & Kestemont, P. (2015). *Convention relative à la réhabilitation du Saumon atlantique dans le bassin de la Meuse*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Benitez, J. P., Nzau Matondo, B., Philippart, J. C., Bernard, B., ... & Kestemont, P. (2016). *Convention relative à la réhabilitation du Saumon atlantique dans le bassin de la Meuse*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Bunel, S., Grandry, L., Spronck, C., & Benitez, J. P. (2017). Poor Performance of a Retrofitted Downstream Bypass Revealed by the Analysis of Approaching Behaviour in Combination with a Trapping System. *River Research and Applications*, 33(1), 27–36.
- Ovidio, M., & Philippart, J. C. (2002). The impact of small physical obstacles on upstream movements of six species of fish. *Hydrobiologia*, 483, 55–69.
- Parrish, D. L., Behnke, R. J., Gephard, S. R., McCormick, S. D., & Reeves, G. H. (1998). Why aren't there more Atlantic salmon (*Salmo salar*)?. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(1), 281-287.
- Peterson, R. H., Spinney, H. C. E., & Sreedharan, A. (1977). Development of Atlantic salmon (*Salmo salar*) eggs and alevins under varied temperature regimes. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 34(1), 31-43
- Philippart, J. C., Ovidio, M., & Poncin, P. (2016, Octobre-Décembre). Le suivi des populations de poissons après reempoisonnements. Cas du saumon atlantique et du barbeau fluviatile. *Forêt.Nature*, 141, 32-39.
- Philippart, J. C., Ovidio, M., Rimbaud, G., Dierckx, A., & Poncin, P. (2010). *Bilan des observations sur les populations de l'anguille dans les sous-bassins hydrographiques Meuse aval, Ourthe, Amblève et Vesdre comme bases biologiques à la prise de mesures de gestion en rapport avec le Règlement Anguille 2007 de l'Union européenne*. Rapport, Université de Liège, Liège.

- Philippart, J. C., Ovidio, M., Rimbaud, G., & Poncin, P. (2013). *Essai d'estimation des dommages piscicoles engendrés par les prises d'eau industrielles et les turbines hydroélectriques dans les cours d'eau de la Province de Liège. Partie F. Les centrales hydro-électriques sur la Vesdre*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Philippart, J. C., Rimbaud, G., Neus, Y., Dierckx, A., Ovidio, M., Poncin, P., ... & Evrard, A. (2010). *Convention relative à la réhabilitation du Saumon atlantique dans le bassin de la Meuse*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Philippart, J. C., Rimbaud, G., Neus, Y., Ovidio, M., Mottet, M., Micha, J. C., ... & Fossion, P. (2008). *Convention d'études pour le suivi scientifique de la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse*. Rapport, Université de Liège, Liège.
- Piper, A. T., Rosewarne, P. J., Wright, R. M., & Kemp, P. S. (2018). The impact of an Archimedes screw hydropower turbine on fish migration in a lowland river. *Ecological Engineering*, 118, 31-42.
- Prignon, C., Micha, J. C., Rimbaud, G., & Philippart, J. C. (1999). Rehabilitation efforts for Atlantic salmon in the Meuse basin area: synthesis 1983–1998. *Hydrobiologia*, 410, 69-77.
- Riley, W. D. (2007). Seasonal downstream movements of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) with evidence of solitary migration of smolts. *Aquaculture*, 273(2-3), 194-199.
- Riley, W. D., Eagle, M. O., & Ives, S. J. (2002). The onset of downstream movement of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in a chalk stream. *Fisheries Management and Ecology*, 9(2), 87-94.
- Robitaille, J. A., Côté, Y., Shooner, G., & Hayeur, G. (1986). Growth and maturation patterns of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the Koksoak River, Ungava, Quebec. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 89, 62-69.
- Ruggles, C. P. (1993). Effect of stress on turbine fish passage mortality estimates. In U. P. Williams, D. A. Scruton, R. F. Goosney, C. E. Bourgeois, D. C. Orr, & C. P. Ruggles (Eds.) *Proceedings of the workshop on fish passage at hydroelectric developments* (pp. 39-46). Canada : Fisheries and Oceans.
- Schneider, J. (2011). Review of reintroduction of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in tributaries of the Rhine River in the German Federal States of Rhineland-Palatinate and Hesse. *Journal of Applied Ichthyology*, 27, 24-32.
- Scruton, D. A., McKinley, R. S., Kouwen, N., Eddy, W., & Booth, R. K. (2002). Use of telemetry and hydraulic modeling to evaluate and improve fish guidance efficiency at a louver and bypass system for downstream-migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts and kelts. *Hydrobiologia*, 483, 83–94.
- Scruton, D. A., McKinley, R. S., Kouwen, N., Eddy, W., & Booth, R. K. (2003). Improvement and optimization of fish guidance efficiency (FGE) at a behavioural fish protection system for downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *River Research and Applications*, 19(5–6), 605–617.
- Scruton, D. A., Pennell, C. J., Bourgeois, C. E., Goosney, R. F., King, L., Booth, R. K., ... & Clarke, K. D. (2008). Hydroelectricity and fish: a synopsis of comprehensive studies of upstream and

- downstream passage of anadromous wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) on the Exploits River, Canada. *Hydrobiologia*, 609(1), 225-239.
- Scruton, D. A., Pennell, C. J., Bourgeois, C. E., Goosney, R. F., Porter, T. R., & Clarke, K. D. (2007). Assessment of a retrofitted downstream fish bypass system for wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts and kelts at a hydroelectric facility on the Exploits River, Newfoundland, Canada. *Hydrobiologia*, 582(1), 155–169.
- Serrano, I., Rivinoja, P., Karlsson, L., & Larsson, S. (2009). Riverine and early marine survival of stocked salmon smolts (*Salmo salar* L.) descending the Testebo River, Sweden. *Fisheries Management and Ecology*, 16(5), 386-394.
- Steinbach, P. (2001). Effets cumulés sur les poissons migrateurs, état et restauration des grands axes de migration du bassin de la Loire. *Hydroécologie Appliquée*, 13, 115-130.
- Stich, D. S., Bailey, M. M., & Zydlewski, J. D. (2014). Survival of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts through a hydropower complex. *Journal of Fish Biology*, 85(4), 1074–1096.
- Stich, D. S., Zydlewski, G. B., Kocik, J. F., & Zydlewski, J. D. (2015). Linking Behavior, Physiology, and Survival of Atlantic Salmon Smolts During Estuary Migration. *Marine and Coastal Fisheries*, 7(1), 68–86.
- Svendsen, J. C., Aarestrup, K., Malte, H., Thygesen, U. H., Baktoft, H., Koed, A., ... & McKinley, R. S. (2011). Linking individual behaviour and migration success in *Salmo salar* smolts approaching a water withdrawal site: implications for management. *Aquatic Living Resources*, 24(2), 201-209.
- Thorpe, J. E. (1994). Salmonid fishes and the estuarine environment. *Estuaries*, 17(1), 76-93.
- Thorstad, E., Finstad, B., Sivertsgård, R., Bjørn, P., & McKinley, R. (2004). Migration speeds and orientation of Atlantic salmon and sea trout post-smolts in a Norwegian fjord system. *Environmental Biology of Fishes*, 71(3), 305-311.
- Thorstad, E. B., Havn, T. B., Sæther, S. A., Heermann, L., Teichert, M. A. K., Diserud, O. H., ... & Økland, F. (2017). Survival and behaviour of Atlantic salmon smolts passing a run-of-river hydropower facility with a movable bulb turbine. *Fisheries Management and Ecology*, 24(3), 199–207.
- Thorstad, E. B., Whoriskey, F., Uglem, I., Moore, A., Rikardsen, A. H., & Finstad, B. (2012). A critical life stage of the Atlantic salmon (*Salmo salar*): behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *Journal of Fish Biology*, 81(2), 500-542.
- Tomanova, S., Courret, D., & Alric, A. (2017). Protecting fish from entering turbines: The efficiency of a low-sloping rack for downstream migration of Atlantic salmon smolts. *Houille Blanche*, (1), 11–13.
- Tomanova, S., Courret, D., Alric, A., De Oliveira, E., Lagarrigue, T., & Tétard, S. (2018). Protecting efficiently sea-migrating salmon smolts from entering hydropower plant turbines with inclined or oriented low bar spacing racks. *Ecological Engineering*, 122, 143-152.
- Travade, F., & Larinier, M. (1992). La migration de dévalaison: problèmes et dispositifs. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (326-327), 165-176.

- Trumbo, B. A., Ahmann, M. L., Renholds, J. F., Brown, R. S., Colotelo, A. H., & Deng, Z. D. (2014). Improving hydroturbine pressures to enhance salmon passage survival and recovery. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(3), 955–965.
- Tytler, P., Thorpe, J. E., & Shearer, W. M. (1978). Ultrasonic tracking of the movements of Atlantic salmon smolts (*Salmo salar* L.) in the estuaries of two Scottish rivers. *Journal of Fish Biology*, 12(6), 575-586.
- Vowles, A. S., Karlsson, S. P., Uzunova, E. P., & Kemp, P. S. (2014). The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish. *Ecological Engineering*, 69, 151–159.
- Whalen, K. G., Parrish, D. L., & McCormick, S. D. (1999). Migration timing of Atlantic salmon smolts relative to environmental and physiological factors. *Transactions of the American Fisheries Society*, 128(2), 289–301.
- Zydlewski, G. B., Haro, A., & McCormick, S. D. (2005). Evidence for cumulative temperature as an initiating and terminating factor in downstream migratory behavior of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(1), 68-78.
- Zydlewski, G. B., Stich, D. S., & McCormick, S. D. (2014). Photoperiod control of downstream movements of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts. *Journal of fish biology*, 85(4), 1023-1041.