



Service public de Wallonie

Université
de Liège



Université de Liège
Faculté des Sciences
Unité de Biologie du Comportement
Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie (LDPH)

Monitoring des passes à poissons de Lorcé et suivi de la dévalaison des saumons par télémétrie

Projet financé par la Direction des Cours d'eau non navigables, Service Public de Wallonie.
Visa N° 15 21360

RAPPORT FINAL
OCTOBRE 2016

Equipe de recherche
J-P. BENITEZ,
A.DIERCKX, B.N. MATONDO
& M.OVIDIO.

Table des matières

1.	Mise en contexte de l'étude	1
2.	Présentation générale du site d'étude : l'Amblève et le complexe hydroélectrique de Lorcé – Heid de Goreux	3
2.1.	L'Amblève	3
2.1.1.	Situation géographique	3
2.1.2.	Zonation piscicole théorique.....	4
2.1.3.	Régime des débits	5
2.1.4.	Régimes des températures	5
2.2.	Le complexe hydroélectrique de Lorcé – Heid de Goreux.	6
2.2.1.	Le barrage de Lorcé	6
2.2.2.	Centrale hydroélectrique de Heid de Goreux.....	12
3.	Monitoring des pièges de capture sur le barrage de Lorcé : montaison & dévalaison.....	15
3.1.	Introduction	15
3.2.	Matériels et méthodes.....	15
3.2.1.	Piège de capture de dévalaison.....	15
3.2.2.	Piège de capture de montaison.....	18
3.2.3.	Monitoring.....	19
3.2.4.	Enregistrement des facteurs environnementaux	19
3.3.	Résultats	20
3.3.1.	Données de capture pour la période d'étude.....	20
3.3.2.	Variabilité interannuelle des captures.....	23
3.4.	Discussion	26
4.	Suivis comportementaux de smolts de saumon atlantique par technologie RFID	28
4.1.	Introduction	28
4.2.	Matériels et méthodes	29
4.2.1.	Configurations du barrage à tester	29
4.2.2.	Fonctionnement du complexe de détection RFID transpondeur-antenne-station.....	32
4.2.3.	Stations d'enregistrement et antennes RFID.....	33
4.2.4.	Marquage et déversements des poissons	38
4.2.5.	Systèmes de capture en dévalaison	41
4.2.6.	Détection des voies de passage	43
4.2.7.	Obtention des données environnementales et de turbinage	44
4.3.	Résultats.....	45

4.3.1. Conditions expérimentales	45
4.3.2. Arrivée des poissons à l'entrée de l'exutoire du barrage Lorcé	47
4.3.3. Mesure de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé	50
4.3.4. Temps de présence au niveau de l'exutoire de dévalaison	51
4.3.5. Analyse quantitative des voies de passage utilisées par les smolts	52
4.3.6. Temps de parcours et vitesse de migration	57
4.3.7. Incidences de différents facteurs sur les voies de passage et les temps de parcours.....	60
4.4. Discussion	64
4.4.1. Etude de l'attraction et de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison de Lorcé	66
4.4.2. Quantification des voies de passage en 2016	69
4.4.3. Temps de parcours et vitesse de progression	70
4.4.4. Influence des différents facteurs sur l'utilisation des voies de passage et temps de parcours	73
5. Conclusions et perspectives	74
6. Remerciements.....	76
7. Références bibliographiques	76

Citation recommandée du rapport :

J-P. BENITEZ, A.DIERCKX, B.NZAU MATONDO & M.OVIDIO (2016). Monitoring des passes à poissons de Lorcé et suivi de la dévalaison des saumons par télémétrie. Rapport final du projet financé par la Direction des cours d'eau non navigables, Service Public de Wallonie. Laboratoire de démographie des poissons et d'hydroécologie de l'Université de Liège, 79 pages.

1. Mise en contexte de l'étude

Des obstacles aux phénomènes de montaison et de dévalaison existent sur l'Amblève suite à la fragmentation du cours d'eau par de nombreux ouvrages, et plus particulièrement à vocation hydroélectrique. Le plan de défragmentation des voies de migrations des espèces piscicoles permet de restaurer la continuité écologique de nos rivières via l'aménagement de passes à poissons sur les différents obstacles prioritaires. Plus particulièrement, le barrage de Lorcé est équipé d'une passe à montaison moderne depuis octobre 2007 et est scientifiquement contrôlée en continu depuis sa mise en fonction. Dans le but de rendre possible la libre circulation dans les deux sens sur ce site stratégique, la société Electrabel (gestionnaire du complexe hydroélectrique) a équipé le barrage d'un exutoire de dévalaison des poissons à la demande du gestionnaire du cours d'eau et suivant les obligations de son permis d'environnement. En effet, mis à part de rares épisodes de crues, cet ouvrage hydroélectrique restait infranchissable de l'amont vers l'aval sans passer par les turbines. Dans une configuration préliminaire (faible débit), son emplacement a été déterminé par des suivis télémétriques de smolts de saumon (Ovidio et al., 2009).

Deux projets d'étude sur l'Amblève ont été précédemment cofinancés par l'Europe (Fonds Européens pour la Pêche, FEP) et la Région Wallonne (SPW, Direction des cours d'eau non navigables). Le premier visait l'étude de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison de Lorcé uniquement par biotélémétrie (Benitez et al., 2013 ; code projet FEP Amblève : 32-1002-004 ; <http://hdl.handle.net/2268/156594>). Le second projet, focalisé sur le site de Lorcé (Benitez et al., 2015a ; code projet FEP exutoire de Lorcé : 32-1202-006 ; <http://hdl.handle.net/2268/187866>) avait pour but dans un premier temps de vérifier l'utilisation de l'exutoire et de déterminer l'efficacité réel du dispositif de franchissement via l'utilisation conjointe d'un piège de capture et de la biotélémétrie. Dans un second temps, afin de mieux appréhender les voies de passage utilisées par des poissons en dévalaison, une étude comportementale a été menée à bien grâce à l'utilisation d'un jeu d'antennes RFID installées au niveau du complexe hydroélectrique barrage de Lorcé – centrale de Heid de Goreux. Sur l'ensemble des deux projets d'étude, une faible efficacité du dispositif de dévalaison a été mise en évidence : attractivité < 40%, efficacité totale < 15% et efficacité corrigé < 40%. La proportion d'individus qui utilisent les turbines était également importante.

Dans la continuité du projet FEP exutoire de Lorcé, cette étude consiste à poursuivre le monitoring scientifique des deux pièges de capture (montaison + dévalaison) installés au

barrage de Lorcé et à poursuivre l'étude des suivis comportementaux par technologie RFID, avec pour principaux objectifs :

- Tester l'efficacité de l'exutoire de dévalaison aménagé au barrage de Lorcé selon différentes configurations physiques du barrage de Lorcé via marquage - piégeage - détection (technologie RFID) :
 - Abaissement partiel en continu d'une vanne mobile du barrage de Lorcé
 - Ajout d'un entonnement à l'entrée de l'exutoire de Lorcé
- Améliorer notre état des connaissances sur les flux de dévalaison entre Lorcé et Heid de Goreux (impact du débit réservé) ainsi qu'entre Lorcé et Méry (piège de dévalaison sur la basse Ourthe) pour les smolts de saumon atlantique.
- Vérifier l'utilisation (diversité spécifique et abondance) des dispositifs de franchissement et approfondir notre connaissance sur les timings de déplacement des espèces de poissons présentes dans ce tronçon de l'Amblève.

2. Présentation générale du site d'étude : l'Amblève et le complexe hydroélectrique de Lorcé – Heid de Goreux

2.1. L'Amblève

2.1.1. Situation géographique

L'Amblève (figure 1) prend sa source à une altitude de 586m près d'Amel et se jette dans l'Ourthe à Comblain-au-Pont (alt. 102m) après un parcours de 88,4km à travers l'Ardenne et le Condroz en aval de Remouchamps. Avec un bassin versant de 1076,8km², l'Amblève est le plus important affluent de l'Ourthe, avant la Vesdre (702km²).

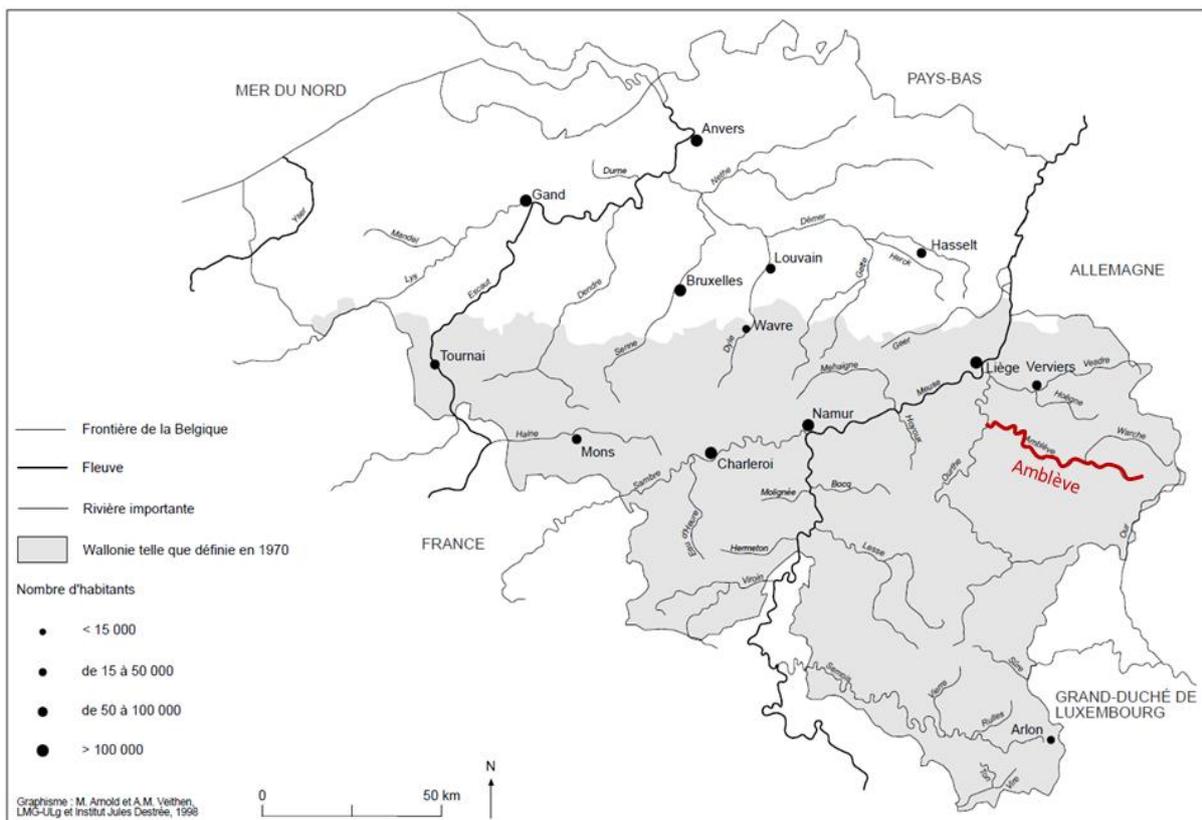


Figure 1 : Carte des principaux fleuves et rivières de Belgique. En rouge l'Amblève (source : LMG-ULg et institut Jules Destrée, 1998)

Les principaux affluents de l'Amblève (figure 2) sont, de l'amont vers l'aval, la Warche (bassin versant de 190km²) avec sa confluence à Malmédy, la Salm (243km²) à Trois-Ponts et la Lienne (149 km²) à Lorcé. Les affluents de moindre importance sont le Möderscheider Bach à Amel, l'Emmel à Monteneau, le ruisseau de Recht à Bellevaux-Ligneville, le Roannay à la Gleize et le Ruisseau du Fond d'Harzé à Aywaille.

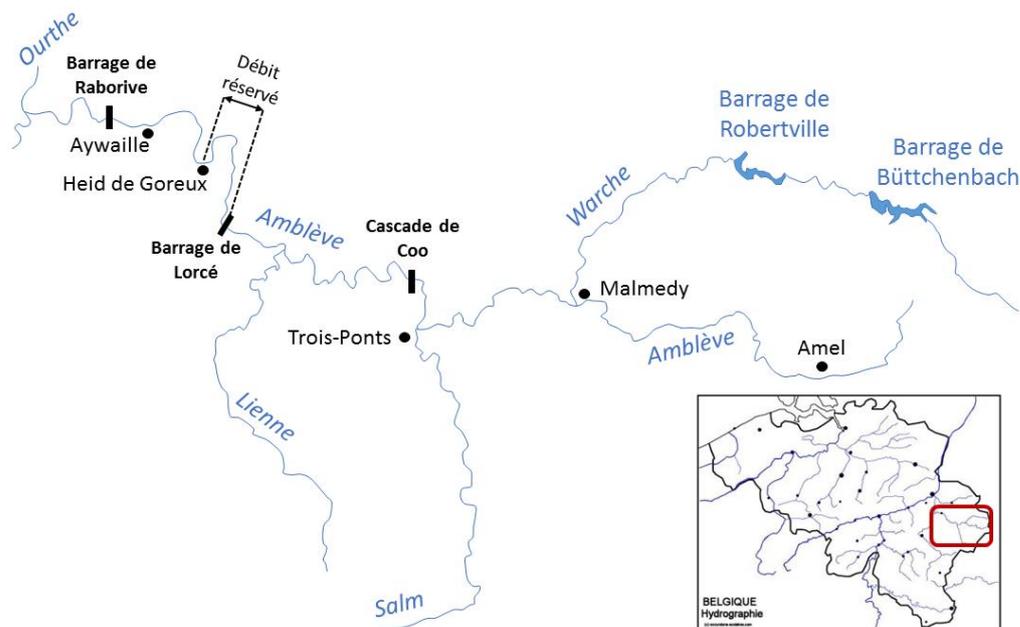


Figure 2 : Carte de l'Amblève depuis sa source près d'Amel jusqu'à son embouchure dans l'Ourthe à Comblain-au-Pont. La carte montre également les principaux obstacles à la libre circulation (barres noires), le débit réservé en aval de Lorcé ainsi que les principaux affluents de l'Amblève : la Warche, la Salm et la Lienne

La pente kilométrique moyenne naturelle de l'Amblève est de 5,48 p/1000 (484m/88,4km). Cependant, le profil en long originel de la rivière est modifié par la présence de plusieurs obstacles qui entraînent de fortes variations de niveaux d'eau (phénomènes d'« hydropeaking ») et entravent la libre circulation des poissons. Les trois principaux obstacles sont la cascade de Coo (chute de 11,8m de haut suite à un recoupement artificiel d'un méandre durant le Moyen-Age), le barrage hydroélectrique de Lorcé (prise d'eau pour la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux situé 8km en aval, avec la présence d'un débit minimum de $3\text{m}^3/\text{s}$ sur ce tronçon, appelé débit réservé) et le barrage de Raborive appartenant à un complexe hydroélectrique.

2.1.2. Zonation piscicole théorique

Du point de vue de la zonation piscicole selon Huet (1949), l'Amblève correspond à une zone à truite théorique de sa source à la confluence avec la Warche, sauf dans le tronçon Deidenberg-Montenau qui présente une pente plus faible et correspond à une zone à ombre. Tout le reste du cours, de la confluence de la Warche jusque l'Ourthe correspond à la zone à ombre sauf un court tronçon à très forte pente (12,5 p/1000), situé en aval de Lorcé, dans les Fonds de Quareux qui correspond à une zone à truite.

2.1.3. Régime des débits

Le régime hydrologique de l'Amblève est notamment connu à la station limnimétrique de Martinrive située sur le cours aval, à quelques kilomètres de la confluence avec l'Ourthe. Pour la période de 2007 à 2015, le débit interannuel moyen est de 17,4 m³/s avec un minimum de 14,1m³/s en 2014 et un maximum de 22,9m³/s en 2007. Le débit estival (juin-juillet-août) moyen est de 9,2m³/s avec un minimum de 4,2m³/s en 2011 et un maximum de 15,9m³/s en 2014. Les débits moyens mensuels les plus bas sont observés majoritairement en période estivale, principalement entre les mois de juin et septembre mis à part une fois en mai (2007). Le débit journalier minimum observé était de 1,7m³/s le 13 août 2015 et le débit journalier maximum était de 228m³/s le 9 janvier 2011.

Le débit de l'Amblève est partiellement régulé (écrêtage des crues + soutien d'étiage) par le fonctionnement des barrages de Bütgenbach et de Robertville sur la Warche. De plus, le fonctionnement des centrales hydroélectriques (CHE) de ces barrages (Bütgenbach et Bévercé-Robertville) provoque des fluctuations du débit au cours de la journée (pour la Warche, voir Assani et Petit, 2003) qui se traduisent par des variations du niveau d'eau aux effets écologiques encore inconnus. Enfin, sur la Warche en aval de Malmédy et sur l'Amblève en aval de sa confluence avec la Warche, on trouve encore 5 autres centrales hydroélectriques : la CHE des Mayeres (Warche à Malmédy), la CHE de Bressaix (Amblève à Stavelot), la CHE de Coo-dérivation (Amblève à Coo), la CHE de Heid de Goreux (Amblève à Lorcé et Heid de Goreux) et la CHE de Raborive (Amblève à Aywaille). Cette succession de 7 centrales hydroélectriques sur l'axe Warche-Amblève engendre un débit saccadé fonctionnant par propagation d'ondes. Le débit enregistré à Martinrive est donc totalement irrégulier.

2.1.4. Régimes des températures

Le régime thermique de l'Amblève est connu grâce à des relevés en continu de la température de l'eau opérés à Lorcé pendant une période de 9 ans, de 2007 à 2015 réalisés par le LDPH-ULg. Les températures moyennes mensuelles toutes années confondues, les plus élevées apparaissent en juillet avec 18°C en moyenne. Pour ce qui concerne la température moyenne mensuelle, un maximum absolu de 20,2°C a été enregistré en juillet 2010. Avec une moyenne de 18,8°C pour les 3 mois d'été, juin-juillet-août, 2015 est l'année la plus chaude pendant l'été de toutes celles de la série observée. La température moyenne annuelle est de 10,4°C avec un maximum de 11,1°C en 2014 pour la période de 2007 à 2015.

2.2. Le complexe hydroélectrique de Lorcé – Heid de Goreux.

Le complexe hydroélectrique de Lorcé - Heid de Goreux est situé sur l'Amblève entre Coo et Remouchamps. Ce complexe est constitué du barrage de prise d'eau de Lorcé et de la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux (figure 3).

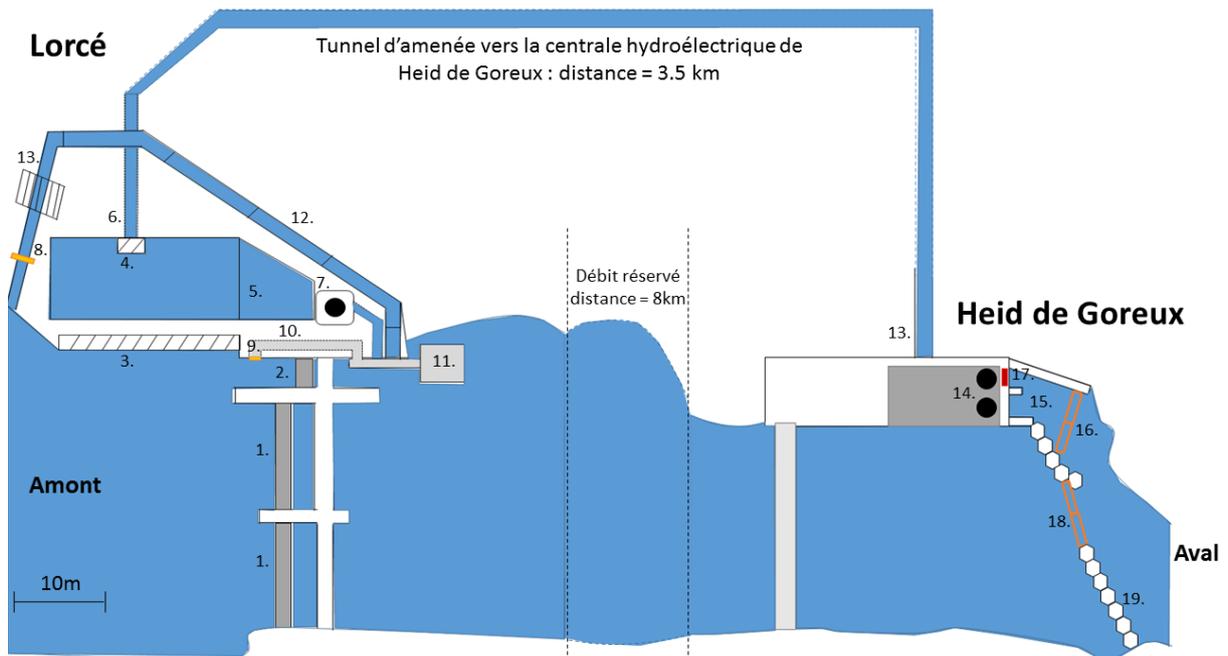


Figure 3 : schéma du complexe hydroélectrique de Lorcé- Heid de Goreux avec le barrage de Lorcé à gauche et la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux à droite.

2.2.1. Le barrage de Lorcé

Le barrage de Lorcé (figure 4), situé sur l'Amblève à 22,9 km de sa confluence avec l'Ourthe, crée une retenue de 50.000 m³ d'eau qui alimente une conduite forcée située en rive gauche aboutissant à la centrale hydroélectrique (CHE) de Heid de Goreux. Celle-ci est installée à 8km en aval du barrage de Lorcé et à 14,9 km en amont de la confluence avec l'Ourthe. Le barrage de Lorcé est un ouvrage constitué de deux vannes mobiles de 17 m de long chacune et créant une chute de Dh= 3,3 m. À côté de ces vannes de régulation se trouve une vanne de vidange (la vanne secteur) de 3m de long, elle sert à vider complètement la retenue d'eau et à accroître l'écoulement des débits en cas de crues. La présence du barrage réduit le débit sur les 8km aval entre le barrage de Lorcé et Heid de Goreux où un débit réservé de 3m³/s est actuellement d'application. La valeur de ce débit réservé reste faible par rapport au module de la rivière, qui est de 19,3m³/s, et est insuffisant pour garantir l'intégrité biologique du

tronçon concerné (Ovidio et al., 2007). Anciennement alimenté par la surverse de la vanne secteur, ce débit réservé est depuis 1993, turbiné par une microturbine de type Francis de $3\text{m}^3/\text{s}$ et de 51 kW avec une vitesse de rotation de 136 tours/minutes (figure 5). La hauteur de chute d'eau avant la turbine est de 3,5m et l'eau est rejetée dans l'Amblève en rive gauche juste en aval du barrage (0,2m plus bas que le niveau aval). Le taux moyen de mortalité selon Larinier & Travade (1999) pour cette turbine est de 23,3% pour des individus de taille moyenne de 150mm (Benitez et al., 2013). La prise d'eau latérale (rive gauche) au niveau de la retenue d'eau de Lorcé, commune pour les deux installations de turbinage qui sont la CHE de Heid de Goreux et la microturbine de Lorcé, est constituée de deux grands bassins de décantation qui sont protégés par un plan de grille métallique constitué de barreaux espacés de 41mm (figure 6). Cependant l'espacement des barreaux est trop important pour empêcher les smolts ou les petits individus (i.e. juvéniles) de passer à travers les turbines (Larinier & Travade 1999). Cette grille est régulièrement nettoyée au moyen d'un dégrilleur automatique et les déchets récoltés sont restitués à la rivière en aval du barrage. Les aménagements réalisés afin de rétablir la libre circulation des poissons sont une échelle à poissons dans le sens de la montaison et un exutoire de dévalaison.



Figure 4 : Vue aval du barrage de Lorcé. En partant de la gauche, deux vannes mobiles de 17m de long et une vanne secteur de 3m de long



Figure 5 : Petite turbine Francis de Lorcé (microturbine) alimentant le débit réservé de 3m³/s : Photo de la prise d'eau à sec



Figure 6 : Vue de la grille amont de la prise d'eau des turbines lorsque le plan d'eau est abaissé suite à la maintenance des vannes mobiles (août 2015)

2.2.1.1. *Echelle à poissons : montaison*

Depuis sa construction en 1932, le barrage de Lorcé était équipé d'une échelle à poissons probablement non fonctionnelle qui rendait cet obstacle pratiquement infranchissable en dehors des rares périodes où les vannes étaient abaissées (travaux de réfection, vidange des boues, crues exceptionnelles). Dans le cadre du programme de rétablissement de la libre circulation des poissons dans les cours d'eau de Wallonie en application de la Décision Benelux d'avril 1996 (Annexe 1 et Benelux, 1999) et dans l'optique de la préservation-restauration de la qualité hydromorphologique des eaux de surface au sens de la Directive Cadre sur l'Eau (CIM, 2001, 2002), la Société productrice d'électricité Electrabel, propriétaire des lieux, et la Direction des Cours d'Eau non navigables du Service Public de Wallonie ont entrepris conjointement en 2007, la construction d'une nouvelle échelle à poissons au barrage de Lorcé (figure 7). Il s'agit d'une échelle moderne à bassins et à fentes verticales, équipée d'un piège de capture protégé par un abri au niveau du bassin le plus en amont. Elle est située en rive gauche, mesure 67m de long et elle est constituée de 15 bassins séparés de 0,25m de haut. Le fond des bassins est recouvert d'un substrat en cailloux provenant de l'Amblève qui permet de simuler un environnement propice aux petites espèces benthiques et ainsi augmenter le caractère multi-spécifique, même si depuis son installation, ce substrat s'est déplacé et ne joue plus son rôle de manière optimale.



Figure 7 : Echelle à poissons de Lorcé à sec (gauche) et en fonctionnement (droite)

2.2.1.2. Exutoire de dévalaison

Depuis 2012, le barrage de Lorcé est équipé d'un exutoire de dévalaison (figure 8). Il se situe sur la rive gauche entre le plan de grille de la prise d'eau du barrage et la vanne secteur. Sa localisation a été choisie suite à un compromis entre des suivis comportementaux de poissons réalisés par radio-pistage (Ovidio et al., 2007 et 2009) et la structure du barrage en lui-même. Le complexe de l'exutoire est constitué d'une ouverture rectangulaire de 0,80 x 1,20 m de section dans la structure en béton existante avec un niveau d'eau entrant de 0,40m, d'un tunnel en béton de configuration hétérogène et long de plusieurs mètres (figure 9). Cependant cette hauteur d'eau dépend du niveau du plan d'eau amont du barrage de Lorcé. La configuration interne de l'exutoire (figure 10) débute par un plat d'environ 1m de long, suivi de deux paliers d'escaliers séparés par un second plat d'un mètre de long. Enfin sa partie terminale est constituée d'un plat 3m de long auquel vient se raccorder un tuyau métallique de 0,9m de diamètre représentant la partie terminale de l'exutoire (partie aval) entraînant une zone de retrait. La hauteur de chute est de $D_h = 1,2-1,5\text{m}$ suivant le niveau aval. L'attractivité a été améliorée au printemps en période de migration des smolts, en plaçant une lampe à mercure au-dessus de l'entrée.

Sur base de mesure réalisées par le LDPH-ULg, le débit dans l'exutoire est estimé à maximum $0,25\text{m}^3/\text{s}$, qui est largement en dessous du débit de $0,6\text{m}^3/\text{s}$ préconisé par le LDPH lors de sa mise en fonction. Un débit d'une telle importance est cependant impossible à mettre en œuvre dans la configuration actuelle du complexe exutoire-piège. Il faut noter également que le plan de grille en amont des turbines peut servir en partie de barrière physique permettant de diriger les smolts vers l'entrée de l'exutoire.



Figure 8 : Vue amont du barrage de Lorcé avec la présence de l'exutoire de dévalaison en rive gauche juste en aval du plan de grille

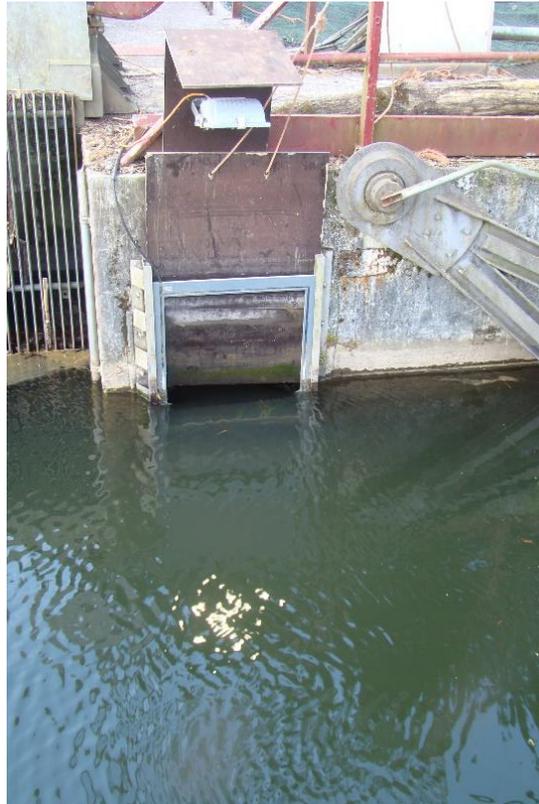


Figure 9 : Entrée de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé



Figure 10 : Vues intérieures de l'exutoire de dévalaison : vue de l'amont (haut à gauche), vue du milieu (haut à droite), zone de retrait aval sortie (bas à gauche) et sortie de l'exutoire (bas à droite)

2.2.2. Centrale hydroélectrique de Heid de Goreux

Le site de Heid de Goreux est caractérisé par la présence d'une centrale hydroélectrique (figure 11), située en rive gauche. La production d'électricité à Heid de Goreux est assurée par deux turbines Francis de 12 et 14 m³/s (figure 12) soit une capacité maximale de turbinage de 26m³/s (minimum 3,5 m³/s) et une vitesse de rotation de 375 tours/minutes chacune. L'eau est acheminée aux turbines grâce à un tunnel d'amenée sous-terrain de 3460m de long en métal de 2m de diamètre entre Lorcé et Heid de Goreux (figure 13). Ce conduit se termine par une cheminée d'équilibre qui sert de réservoir et dont le niveau de l'eau est le même que le niveau amont du barrage de Lorcé. L'eau est ensuite amenée du réservoir aux turbines par une conduite forcée de 54,3m de long de 3m de diamètre. La hauteur de chute nette entre la prise d'eau à Lorcé et les turbines est de 39,4m et la puissance nominale totale de ces turbines est de 7000kW. L'eau turbinée est restituée dans l'Amblève à Heid de Goreux via un canal de fuite de 11,8m de large. Le taux moyen de mortalité selon Larinier & Travade (1999) pour ces turbines est de 31% pour des individus de taille moyenne de 150mm (Benitez et al., 2013). La fin du débit réservé, juste en amont du canal de fuite est constituée d'un seuil en enrochements percé d'une échancrure centrale de 9,4m. Il permet d'augmenter la vitesse du courant à cet endroit pour attirer les poissons dans cette partie de la rivière et minimiser la formation d'obstacle hydraulique à l'endroit de la séparation débit naturel-débit réservé et ainsi favoriser l'attraction des poissons rhéophiles (Ovidio et al., 2007) (figure 14). En effet, en amont de l'échancrure, la largeur de la rivière est de 25m, ce qui, associé avec les 3m³/s de débit, n'encourage pas les migrants à utiliser cette voie de passage en montaison. Les études réalisées en 2005-2007 par radio pistage (Ovidio et al., 2007) avant la mise en place de ce cordon d'enrochement ont démontré que la transition débit naturel - débit réservé perturbe les espèces comme le barbeau et la truite lors de leur migration de reproduction, qui avaient alors tendance à chercher des frayères en aval de Heid de Goreux, plutôt que de poursuivre leur déplacement vers l'amont. Depuis l'installation des enrochements, plus aucun suivi n'a été réalisé et l'efficacité du dispositif est inconnue.



Figure 11 : Vue aval de la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux avec la présence de l'énrochement et de son échancrure



Figure 12 : Turbines FRANCIS de la CHE de Heid de Goreux sur l'Amblève

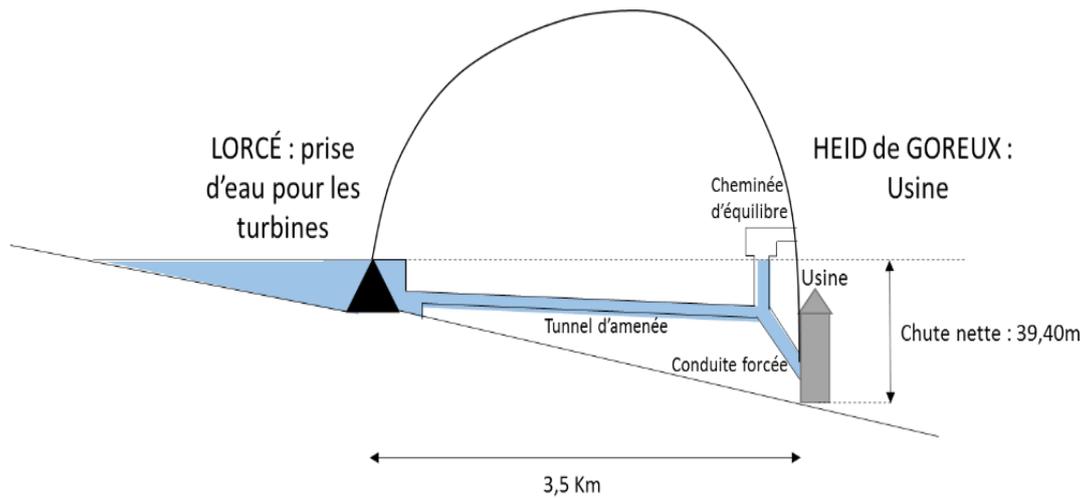


Figure 13 : Schéma représentant la disposition du complexe hydroélectrique de Lorcé-Heid de Goreux, avec les différentes caractéristiques structurales à partir du barrage de Lorcé jusqu'à l'usine de turbinage de Heid de Goreux



Figure 14 : Vue amont de l'enrochement à la fin du débit réservé (en haut) et vue aval du canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux (à l'arrêt)

3. Monitoring des pièges de capture sur le barrage de Lorcé : montaison & dévalaison

3.1. Introduction

L'échelle à poissons de Lorcé a été contrôlée scientifiquement en continu depuis son aménagement en 2007. Son utilisation a été analysée en détail (voir Benitez et al., 2015b) et elle s'est montrée multi-spécifique, avec une abondance par espèce globalement respectée par rapport aux proportions d'espèces observées dans le secteur aval de l'Amblève. Pour la dévalaison, une étude cofinancée par l'Europe (Fonds Européens pour la Pêche, FEP) et la Région Wallonne (SPW, DGO3-DCENN) a permis d'évaluer l'efficacité et l'utilisation continue de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé. Lors de ce projet FEP, un piège de capture a été aménagé en sortie de l'exutoire de dévalaison qui permet la capture des poissons toutes espèces confondues et toutes les gammes de taille (filet maillant de 8mm). Le monitoring de ce piège de capture a permis de visualiser l'utilisation de l'exutoire avec la capture de 24 espèces différentes pour près de 2000 individus. Cependant, l'exutoire était principalement utilisé par des espèces de grand migrateurs (saumon atlantique, truite de mer et anguille argentée). La proportion de poissons holobiotiques potamodromes était donc fortement déséquilibrée par rapport aux espèces en montaison dans l'échelle à poissons, mis à part pour la truite commune. La poursuite du monitoring des pièges de captures de dévalaison et de montaison a pour objectif d'approfondir nos données d'utilisation (espèces, nombre et biomasse) des passes migratoires mais également d'étudier les variations interannuelles.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Piège de capture de dévalaison

Le piège de dévalaison a été installé à la sortie de l'exutoire fin 2013 (figure 15). La sortie de l'exutoire était prolongée par huit goulottes en bois marin rectangulaires de 0,6 x 1,2m soit 8,4 m de long, qui mène les poissons vers un piège de capture flottant. Lors d'un épisode de crue fin novembre 2015, la goulotte a été fortement abimée (figure 16). Afin d'éviter ces dégâts récurrents, le système de goulotte a été modifié au début du mois de mars 2016 lors de sa réparation. La goulotte pour le printemps 2016 était donc constituée de 3 sections en bois marin (0,6 x 1,2m) prolongées d'un tuyau en PVC de 6m de long (0,5m de diamètre) jusqu'au piège de capture (figure 17). Le piège flottant n'a pas évolué durant cette période d'étude et il est constitué d'un filet (mailles de 8mm) de 2,40m de long sur 1,20m de large et sur 2,5m de profondeur (dont 1,5m immergés) qui est placé sur un support métallique rectangulaire (figure 18). Ce piège de capture situé sur la rivière juste en aval du barrage, est installé sur un système de pontons flottants. L'accès au piège flottant a été rendu possible via

une plateforme sécurisée composée d'un premier escalier, d'un palier intermédiaire et d'un second escalier suspendu.



Figure 15 : Vue globale du piège de capture à la dévalaison au niveau du barrage de Lorcé



Figure 16 : Dégâts occasionnés à la goulotte du piège de dévalaison lors de la crue de fin novembre 2015



Figure 17 : Vue aval de la nouvelle goulotte du piège de dévalaison (mars 2016)



Figure 18 : Vue d'ensemble du piège de capture de dévalaison (mars 2016)

Suite à des augmentations de débit ($>30\text{m}^3/\text{s}$, limite fixée en accord avec le comité d'accompagnement du projet), le piège de dévalaison a dû être retiré (figure 19) à plusieurs

reprises pour éviter qu'il ne se fasse emporter vers l'aval. De plus, le système de piégeage n'est plus efficace lors d'un abaissement des vannes mobiles du barrage de Lorcé, suite à une augmentation du niveau d'eau en aval du barrage. Les périodes d'arrêt de piégeage sont :

- Du 19 novembre 2015 au 14 mars 2016
- A partir du 30 mai 2016 (selon le cahier des charges)



Figure 19 : Retrait du piège de dévalaison lors de pics de débit (>30m³/s) (à gauche) et incapacité de contrôler le piège (à droite)

3.2.2. Piège de capture de montaison

L'échelle à poissons de Lorcé est équipée d'une cage de capture dont l'espacement entre les barreaux est de 3cm (figure 20). Afin de capturer une plus grande variété d'espèces de tailles différentes (petites espèces benthiques mais aussi les juvéniles de salmonidés et cyprinidés par exemple) qui transitent par la passe à poissons, la cage a été recouverte d'un treillis avec une maille de 1 x 1cm. A chaque monitoring la cage est relevée à l'aide d'un palan électrique.



Figure 20 : Cage de capture placée au niveau du bassin le plus en amont de l'échelle à poissons du barrage de Lorcé

3.2.3. Monitoring

Les pièges de capture ont été contrôlés de 2 à 5 fois par semaine de novembre 2015 à mai 2016, excepté le piège de dévalaison lors des différents retraits du piège pour cause de crue. A chaque contrôle, pour le piège de dévalaison, le filet est remonté et les poissons capturés sont transférés dans une manne. Pour le piège de l'échelle à poissons, la cage est remontée à l'aide du palan électrique et les poissons sont transférés dans une manne. Tous les individus capturés sont ensuite anesthésiés à l'aide d'une solution d'Eugénol ($0,1\text{ml.l}^{-1}$) (figure 21). Chaque individu est déterminé au niveau de l'espèce, pesé (au gramme près) et mesuré à la fourche de sa nageoire caudale (en mm). Chaque individu est également scanné par le lecteur portable RFID afin de vérifier s'il y a recapture après un premier marquage.



Figure 21 : Dispositif de mesures biométriques des poissons capturés

3.2.4. Enregistrement des facteurs environnementaux

L'enregistrement des facteurs environnementaux durant le suivi des pièges de capture permet d'étudier l'influence de ces variables sur les déplacements des poissons. La température est enregistrée à l'aide d'un enregistreur automatique de température (Onset TidBit) placé au niveau du barrage de Lorcé. Le débit est téléchargé à partir du site Aqualim (SPW-DCENN) au niveau des stations de La Gleize pour l'Amblève et de Lorcé pour la Lienne, l'addition de ces deux débits donne le débit de l'Amblève au niveau du barrage de Lorcé.

3.3. Résultats

3.3.1. Données de capture pour la période d'étude

Dévalaison

Du 1^{er} novembre 2015 au 30 mai 2016, nous avons réalisé 35 contrôles du piège de capture de l'exutoire de dévalaison installé au barrage de Lorcé. Sur cette période, 275 individus ont été capturés appartenant à 16 espèces différentes pour une biomasse totale de 29,7kg (figure 22).

D'un point de vue nombre ce sont les salmonidés qui dominent avec près de 92% des captures. L'espèce dominante est le saumon atlantique sous sa forme smolt (stade de migration vers la mer) avec 141 individus capturés. Cependant 94% des individus proviennent du déversement de poissons marqués par marque RFID lors de l'étude des voies de passage (i.e. point 4.). Si on fait abstraction du saumon atlantique (modèle biologique utilisé durant cette étude et espèce en cours de réintroduction), l'espèce dominante est la truite commune avec la présence des deux écotypes : truite de rivière (n=64) et truite de mer (n=29) sous sa forme smolt. On notera également la présence de n=9 truites arc-en-ciel, de n=2 ombres et de n=1 omble de fontaine. Parmi les cyprinidés (6% des captures), nous avons capturé n=6 chevaines, n=6 vandoises, n=1 rotengle, n=1 gardon, n=1 vairon et n=2 ablettes spiralin. Enfin n=2 lamproies de planer, n=1 brochet, n=1 perche, n=1 carpe herbivore et n=1 carpe chinoise ont été capturés dans le piège de dévalaison.

D'un point de vue biomasse, lorsqu'on prend ou non en compte le saumon atlantique (5,3kg), c'est la famille des salmonidés qui domine avec près de 68% de la biomasse totale (24,3kg) contre 24% pour les cyprinidés. L'espèce dominante est la truite commune (45%) avec une somme totale de 9,6kg (40%) pour l'écotype rivière et 1,3kg (5%) pour l'écotype truite de mer. Les espèces les plus représentées d'un point de vue biomasse sont ensuite la truite arc-en-ciel avec 4,2kg (17%), la chevaine avec 2,3kg (9%) et la carpe herbivore avec 2kg (7%).

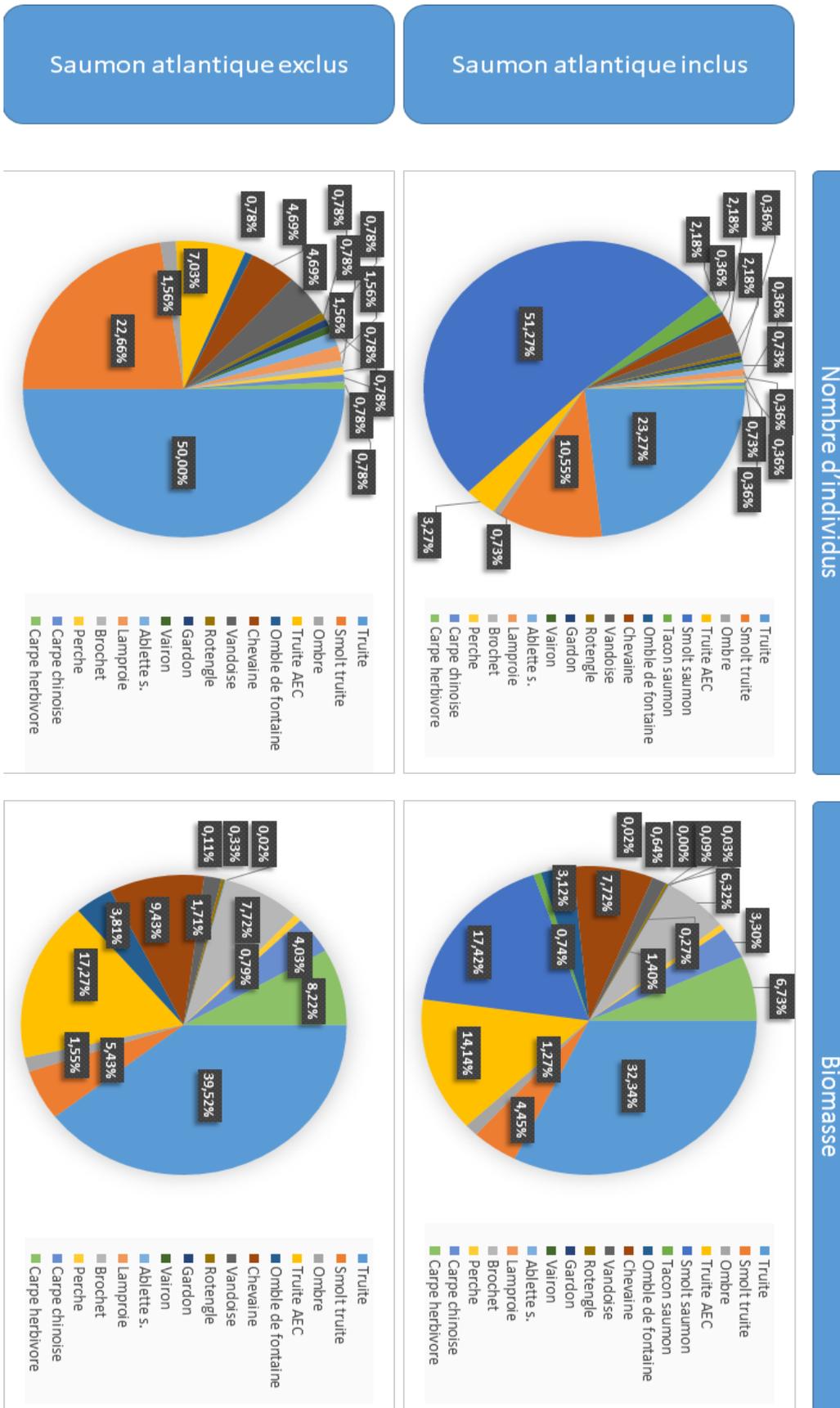


Figure 22 : Représentations schématiques de la diversité des captures d'un point de vue nombre et d'un point de vue biomasse en prenant ou non en compte la capture du saumon atlantique dans le piège de dévalaison de Lorcé

Montaison

Du 1^{er} novembre 2015 au 30 mai 2016, nous avons réalisé 56 contrôles de la cage de capture de Lorcé. Sur cette période, 106 individus ont été capturés appartenant à 8 espèces différentes pour une biomasse totale de 24,2kg (figure 23).

En nombre, ce sont les salmonidés qui sont les plus représentés durant cette période d'étude avec 94% des captures contre 5% pour les cyprinidés. L'espèce dominante est la truite commune avec 70 individus (66%) suivie de la truite arc-en-ciel avec 27 individus (25%) et de l'ombre avec 3 individus (3%). Les autres espèces sont le barbeau (n=1), la vandoise (n=1), le gardon (n=1), l'ablette spirilin (n=2) et la loche franche (n=1).

En biomasse ce sont également les salmonidés qui dominent avec une biomasse totale de 22,1kg (92%) contre 2kg pour les cyprinidés. L'espèce dominante est la truite arc-en-ciel avec une biomasse de 11,1kg (46%) suivie de la truite commune avec 10,5kg (43%), du barbeau avec 1,7kg (7,1%) et de l'ombre avec 0,6kg (2%).

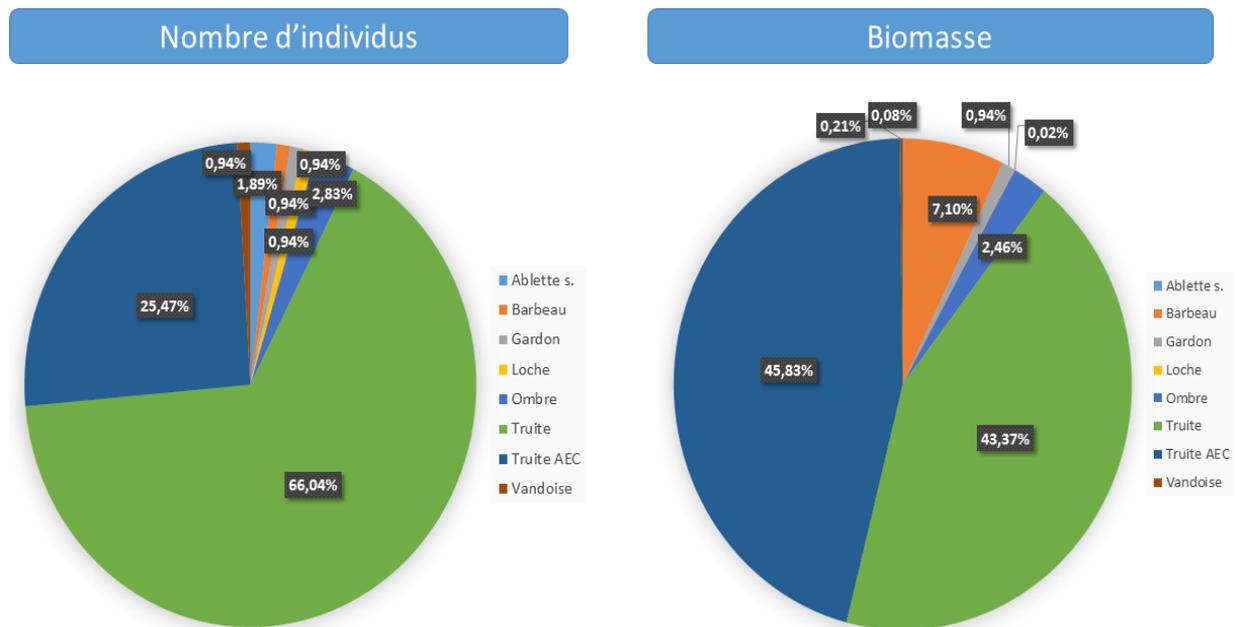


Figure 23 : Représentations schématiques de la diversité des captures d'un point de vue nombre et d'un point de vue biomasse dans le piège de montaison du barrage de Lorcé

3.3.2. Variabilité interannuelle des captures

Dévalaison

Depuis le début du monitoring, l'année 2014 est la seule année complète. En effet, 2013, 2015 et 2016 ont été contrôlées respectivement de fin novembre à décembre (début du piégeage), de mars à novembre inclus (impossibilité de contrôler suite aux crues) et de mi-mars à mai inclus (crues + arrêt du monitoring). Néanmoins, ces données permettent de visualiser des variabilités interannuelles à l'échelle globale mais également à l'échelle spécifique (tableau 1). Au total 28 espèces différentes ont été capturées dans le piège de dévalaison avec la présence de 2159 individus pour une biomasse totale de 242,6kg. Plus particulièrement, cette troisième année de monitoring a permis de capturer trois nouvelles espèces, deux indigènes (le rotengle et le brochet) et une espèce non indigène (la carpe chinoise). On observe que globalement le nombre d'individus capturés diminue de 80% entre 2014 et 2016. Les exemples les plus concrets sont la truite commune (sous ses deux écotypes : rivière et mer), le saumon atlantique (sous sa forme smolt) et l'anguille.

Tableau 1 : Evolution temporelle des captures dans le piège de dévalaison de Lorcé de décembre 2013 à mai 2016. * Années de monitoring incomplètes

Espèces	2013*		2014		2015*		2016*	
	Nb	g	Nb	g	Nb	g	Nb	g
Truite commune	1	3	218	36028	84	13566	58	7794
Smolt truite de mer	0	0	77	3716	92 (21)	5739	29	1321
Ombre	0	0	4	1333	5	1663	2	378
Smolt de saumon atlantique	0	0	908 (64)	35392	215 (35)	6828	141 (132)	5177
Tacon de saumon atlantique	3	155	40	1309	7	225	1	20
Truite AEC	0	0	15	14223	25	8366	9	4201
Ombre de fontaine	0	0	2	1064	3	1423	1	927
Truite léopard	0	0	0	0	1	734	0	0
Barbeau	0	0	0	0	15	1377	0	0
Chevaine	0	0	11	9253	2	262	6	2294
Vandoise	0	0	19	2228	15	1737	5	415
Ide mélanote	0	0	2	212	0	0	0	0
Rotengle	0	0	0	0	0	0	1	80
Gardon	0	0	8	367	6	166	1	10
Brème	0	0	1	3	1	400	0	0
Tanche	0	0	0	0	1	2909	0	0
Carpe	0	0	2	10100	0	0	0	0
Carpe herbivore	0	0	6	9096	2	2550	1	2000
Carpe chinoise	0	0	0	0	0	0	1	981
Goujon	0	0	2	27	1	32	0	0
Ablette spirin	0	0	7	68	9	19	2	26
Vairon	0	0	1	7	2	3	0	0
Anguille	0	0	21	35764	12	5741	0	0
Lamproie de planer	0	0	12	70	5	23	2	6
Brochet	0	0	0	0	0	0	1	1877
Perche	0	0	2	6	2	406	1	191
Gremille	0	0	1	32	0	0	0	0
Poisson chat	0	0	1	249	0	0	0	0
Loche franche	0	0	1	6	9	40	0	0
Epinoche	0	0	16	32	2	2	0	0
Total	4	158	1377	160585	516	54211	262	27698

Montaison

Avec le début d'une dixième année de monitoring en continu, on dénombre au total 6286 individus pour une biomasse totale de 592 kg. La variabilité interannuelle des captures a été une nouvelle fois mise en évidence (Ovidio et al., 2011 ; Benitez et al., 2013, 2015a et 2015b). On constate que la première année complète de monitoring (2008) reste l'année avec la biomasse la plus importante : effet d'ouverture (Benitez et al., 2015b). Il s'en est suivi une diminution continue des captures et de la biomasse totale jusqu'en 2013. En 2014, un regain de biomasse a été observé (+100% par rapport à 2013) qui s'est confirmé en 2015 avec la deuxième meilleure année d'un point de vue de la biomasse avec près de 107kg au total. On constate que 2015 est également la meilleure année d'un point de vue du nombre d'individus capturés avec 1974 individus. Ce pic s'explique par l'importante capture de vairons (plus de 1000) et d'ablettes spiralin (+ de 500) mais également de plus gros individus comme la truite commune, la truite arc-en-ciel et le barbeau. En revanche, pour l'année 2016, le nombre de capture total est faible même en prenant en compte que les données ne concernent que les mois de janvier à mai 2016.

Tableau 2 : Inventaire des captures (nombre d'individus et biomasse) dans le piège de montaison de Lorcé par année depuis 2007 à juin 2016 ainsi que le total par espèce. *indique les années incomplètes

Espèce	2007*		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016*		Total	
	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g	N	g
Truite commune	117	22890	131	21162	70	13111	85	15360	51	12144	48	10489	64	9053	167	34802	171	28983	23	2435	843	157955
Ombre	1	781	25	4099	13	3987	8	945	10	1934	11	1107	10	2430	25	2991	16	3340	3	594	119	21614
Saumon	-	-	1	59	1	8	17	735	13	672	-	-	1	26	7	354	-	-	-	-	40	1854
Truite AEC	-	-	5	1645	13	4708	24	12380	22	11845	8	2812	10	2430	16	12688	58	23519	21	8551	148	68859
Ombre de fontaine	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	1272	-	-	3	1272
Barbeau	-	-	62	97910	6	9532	30	39345	23	27579	6	7885	5	8634	9	15036	32	42366	1	1716	172	248053
Chevaine	-	-	12	6166	9	10572	7	1709	31	7140	8	166	11	2976	2	171	4	190	-	-	82	29017
Hotu	-	-	2	3269	-	-	-	-	1	13	-	-	1	27	-	-	-	-	-	-	4	3309
Vandoise	-	-	8	243	-	-	5	65	32	428	7	113	-	-	16	333	6	354	-	-	70	1448
Gardon	-	-	-	-	2	61	-	-	3	43	-	-	1	80	4	79	8	391	-	-	17	427
Brème	-	-	1	1528	-	-	1	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1534
Brème bordelière	-	-	-	-	1	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	58
Carpe	-	-	1	3828	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	2	3828
Vairon	-	-	26	79	118	426	1121	2430	497	1585	-	-	28	81	-	-	1142	3040	-	-	2932	7641
Ablette commune	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-	-	2	1
Ablette spirilin	-	-	56	565	3	34	49	291	472	3137	52	432	22	129	267	2145	517	2909	1	10	1431	9572
Goujon	-	-	118	2175	23	561	12	271	34	390	8	171	16	276	23	516	14	288	-	-	248	4648
Anguille	-	-	1	143	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	36	-	-	-	-	2	179
Lamproie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	1
Brochet	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
Perche	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2006	3	301	-	-	-	-	4	2307
Epinoche	-	-	1	1	1	2	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	4
Loche	-	-	2	2	3	11	1	4	5	24	1	2	-	-	3	25	1	5	1	5	16	73
Chabot	-	-	2	11	2	8	-	-	3	31	1	11	-	-	-	-	1	19	-	-	8	61
Total	118	23671	454	142885	265	43079	1361	73542	1197	66965	151	23189	173	28149	543	69477	1974	106677	50	13311	6151	563716

3.4. Discussion

Cette partie s'intègre dans la continuité de plusieurs projets de recherche menés à bien par le LDPH-Ulg depuis plusieurs années. En effet, le monitoring des pièges de capture installés au niveau de l'échelle à poissons et de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé se déroule depuis respectivement 2007 et 2013 (Ovidio et al., 2007, et 2011 ; Benitez et al., 2013, 2015a et 2015b).

Le monitoring du piège de capture de dévalaison a déjà démontré que l'utilisation de l'exutoire de dévalaison était multi-spécifique et que les périodicités de capture pouvaient être variable d'un point de vue intra- et interannuel. Néanmoins, l'exutoire est utilisé principalement par des grands migrateurs (saumon atlantique, truite de mer ou encore l'anguille) et par un faible pourcentage d'individus holobiotiques potamodromes mis à part la truite commune. Cette tendance a été confirmée durant cette période d'étude mais avec un taux de capture moins important pour le smolt de saumon atlantique. La diminution du taux de capture de smolts de saumon atlantique s'explique certainement, comme pour 2015 (Benitez et al., 2015b) par la présence d'une période de crue au début du printemps et donc de l'abaissement des vannes. De la même manière qu'en 2015, ce résultat a été également observé sur la basse Ourthe dans le piège de dévalaison de Méry (seulement quelques centaines d'individus contre des milliers les autres années). Plus précisément dans le cadre du programme « saumon » (Ovidio et al., 2015), des jeunes saumons sont déversés chaque année par le SPW-DNF sous forme de tacon dans le tronçon amont du barrage de Lorcé. Avec un nombre relativement constant ($\pm 60\ 000$ individus déversés chaque année), on devrait retrouver dans le piège de dévalaison de Lorcé, la même proportion d'individus d'année en année. Ce constat implique que lors de l'évaluation de l'utilisation et/ou de l'efficacité d'un dispositif de franchissement, il est primordial d'intégrer toute variation environnementale et de la réaliser sur plusieurs années consécutives afin de ne pas biaiser l'interprétation finale.

Le caractère mutli-spécifique de l'échelle à poissons a déjà été démontré auparavant (Benitez et al., 2015a). Néanmoins pour cette période d'étude, on a pu observer la présence plus importante de salmonidés (+de 90%) dans le piège de capture de montaison avec plus particulièrement la truite commune (espèce indigène) et la truite arc-en-ciel (espèce non indigène). Ce constat s'explique par la période d'étude qui englobe à la fois la période de migration de reproduction de la truite commune en automne (Ovidio et al., 1999) mais également la migration printanière observée depuis le début du monitoring (Benitez et al., 2015a). Pour la truite arc-en-ciel, le nombre de capture augmente d'année en année avec moins d'une dizaine par an en 2007 à plusieurs dizaines en 2015 et 2016 (année incomplète). Il est fort possible que cette augmentation du nombre de truite arc-en-ciel soit dépendante

de repeuplement en truite dans le tronçon aval de l'Amblève. En revanche les cyprinidés sont peu représentés pour cette période avec par exemple seulement 1 barbeau capturé durant ce printemps 2016. Ce constat s'explique certainement par l'arrêt du monitoring fin mai alors que la période de migration du barbeau n'était pas encore finie (mi-mai à fin juin) et que le printemps était très frais. Enfin, cette période d'étude a permis de confirmer que d'un point de vue interannuel, l'année 2015 est une bonne année avec le record de capture en truite commune (n=171) et arc-en-ciel (n=56) depuis 2007. Comme déjà cité auparavant (Benitez et al., 2015a), cette augmentation du nombre et de la biomasse principalement pour les espèces dominantes est certainement liée à une variation naturelle en recrutement pour ces espèces.

4. Suivis comportementaux de smolts de saumon atlantique par technologie RFID

4.1. Introduction

Dans une configuration test (débit maximum de 250l/s), l'exutoire de Lorcé s'est avéré peu efficace lors de suivis comportementaux de smolts de saumon atlantique réalisés de 2012 à 2015 et de smolt truite en 2015. En 2012 et 2013 des suivis comportementaux par technologie RFID ont uniquement été réalisés en vue de mieux comprendre le comportement d'approche des smolts. Ces suivis ne permettaient pas de déterminer l'efficacité de l'exutoire de Lorcé car il n'était pas possible de vérifier qu'un individu détecté à l'entrée de l'exutoire l'utilisait par la suite. Ces deux premières années ont permis de déterminer un taux d'attractivité qui représente le nombre de poissons détectés à l'entrée de l'exutoire par rapport au nombre de poissons déversés : 26% en 2012 et 38% en 2013 (Benitez et al., 2013). Cependant, cette première étude n'était pas suffisante pour appréhender de manière suffisante l'utilisation réelle de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé. Afin de vérifier l'efficacité réelle de l'exutoire, un piège de capture a été installé fin 2013 à la sortie de l'exutoire de dévalaison et utilisé à partir du printemps 2014 en combinaison avec le système de détection RFID. De plus, dans l'optique d'être le plus précis possible, la notion d'efficacité corrigée a été introduite lors de l'évaluation du dispositif de franchissement (Ovidio et al., 2016) qui consiste à prendre en compte le nombre de poissons passés par l'exutoire par rapport au nombre de poissons détectés à l'entrée de l'exutoire. Il est en effet difficile de vérifier l'état des poissons après déversement et s'il y a eu prédation ou capture avant le début de leur dévalaison. Les suivis réalisés en 2014 ont montré une efficacité totale de 13% et une efficacité corrigée de 37%. Après cette première année de piégeage, il s'est avéré que d'autres voies de passage étaient utilisées par les poissons étudiés. Une 4^{ème} année de suivis comportementaux a été mise en place en 2015 avec l'intégration d'un réseau d'antenne au niveau de Heid de Goreux pour établir avec précision les voies de passage utilisées en complément de l'exutoire de dévalaison. L'efficacité totale pour 2015 était de 7% et la corrigée de 40%. Il a été mis en évidence que le passage par les différentes turbines du complexe hydroélectrique de Lorcé-Heid de Goreux était fréquent.

L'objet de cette 5^{ème} année de suivi au barrage de Lorcé est de répéter l'expérience de 2015 avec l'utilisation combinée d'antennes RFID à Lorcé et Heid de Goreux ainsi que les pièges de capture de Lorcé (Amblève) et de Méry (Ourthe). Les principaux objectifs sont :

- Tester l'abaissement partiel d'une vanne mobile du barrage de Lorcé sur le succès de dévalaison au niveau de ce tronçon de l'Amblève.

- Etudier l'effet d'un entonnement placé à l'entrée de l'exutoire de dévalaison sur les taux d'attractivité et d'efficacité.
- Améliorer nos connaissances de l'impact du débit réservé situé en aval du barrage de Lorcé sur le succès de dévalaison par cette voie de passage et sur les vitesses de dévalaison.

4.2. Matériels et méthodes

4.2.1. Configurations du barrage à tester

- a. Dans un premier temps, suite aux recommandations formulées lors du projet FEP exutoire de Lorcé (Benitez et al., 2015b), l'abaissement partiel d'une des deux vannes mobiles du barrage de Lorcé a été choisi comme configuration test. Il était proposé d'effectuer cet abaissement aux heures de migration vers l'aval des smolts (fin de journée – début de nuit) mais il s'est avéré qu'il était difficile pour Electrabel de régler cet abaissement à heure fixe chaque jour. La piste privilégiée a donc été de réaliser un abaissement partiel de vanne en continu durant une période donnée. Cet abaissement de vanne a été testé le 24/03/2016 et nous avons choisi pour l'expérience de dévalaison un abaissement de 40cm du vérin (figure 24). La lame d'eau qui passait par au-dessus de la vanne était de 17cm avec une vitesse de courant d'environ 0,8m/s (débit estimé = 2,3m³/s). Il est important d'ajouter que lors de cet abaissement de vanne, la microturbine du barrage de Lorcé qui laisse passer habituellement l'eau pour le débit réservé ne fonctionnait pas. Le débit réservé n'était donc pas plus important que lors des suivis antérieurs où les vannes étaient toutes les deux relevées (3m³/s).



Figure 24 : Vue latérale de la vanne mobile du barrage de Lorcé lors de son abaissement partiel durant les suivis comportementaux de smolts de saumon atlantique au printemps 2016

- b. La deuxième configuration à tester était l'aménagement d'un système d'entonnement à l'entrée de l'exutoire de dévalaison (figure 25). Cet entonnement consiste en un dispositif fixe à faible pente composée d'une entrée large et d'une sortie étroite. La vitesse de courant, faible à l'entrée, est progressivement augmentée tout en minimisant les phénomènes de décollement et les turbulences grâce à son profil elliptique (Larinier et Boyer-Bernard, 1991). Il doit permettre de ne pas rebuter le poissons à cause d'une accélération trop brusque du courant tout en l'empêchant de faire demi-tour grâce à une vitesse de courant supérieure à la capacité de nage du poisson dans la partie terminale bombée de l'entonnement. Dans notre cas, cet

entonnement (long de 1,3m) a été placé de biais afin de favoriser le placement de l'entrée dans la veine de courant principale (largeur initiale=1,3m et largeur finale=0,7m). Des mesures sur places ont été réalisées le 29/04/2016 via l'utilisation d'une mire et d'un courantomètre (modèle Flo-Mate 2000, Marsh-McBirney INC). De l'entrée à la sortie de l'entonnement (figure 26), les hauteurs d'eau passent de 0,55m à 0,3m et les vitesses de courant de 0,35m/s à 1,38m/s.



Figure 25 : Système d'entonnement placé à l'entrée de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé

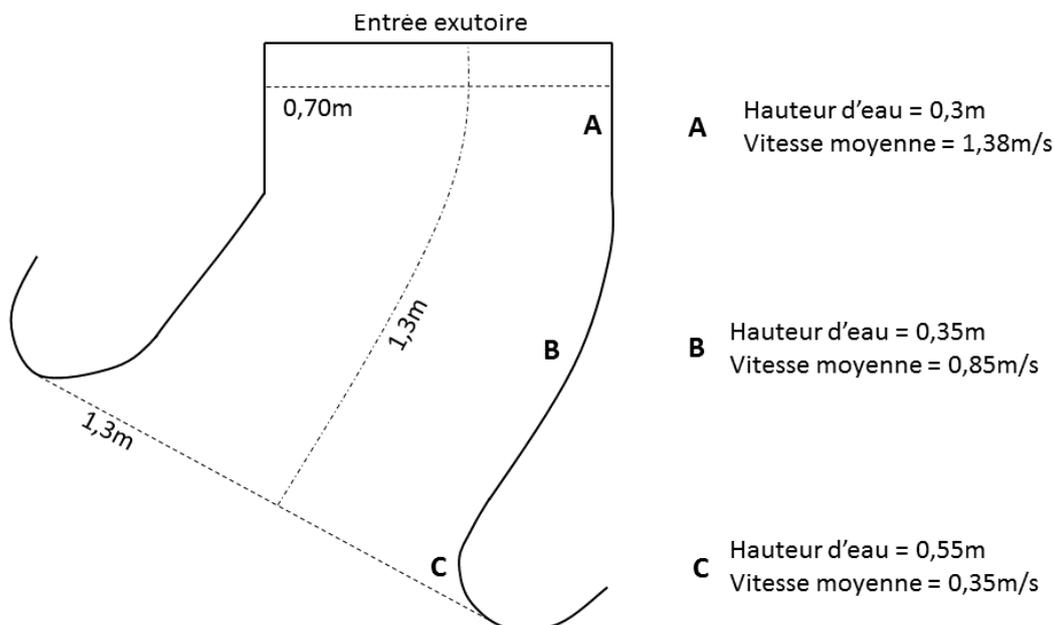


Figure 26 : Schéma de l'entonnement installé devant l'entrée de l'exutoire de Lorcé avec les hauteurs d'eau et la vitesse de courant moyenne à la sortie de l'entonnement (A), à son milieu (B) et à son entrée (C)

4.2.2. Fonctionnement du complexe de détection RFID transpondeur-antenne-station

Le système de détection RFID (Radio Frequency IDentification) se compose de transpondeurs, de stations d'enregistrement automatique et d'antennes de détection. Les transpondeurs (Texas Instrument 32mm GLASS TRANSPONDER) sont des marques semi-passives car elles ne sont activées qu'en présence d'un champ magnétique à une fréquence donnée. Ces transpondeurs ne possèdent pas de batterie, ont une durée de vie théorique infinie et ils sont adaptés pour marquer de petits individus grâce à leur faible taille. Les antennes sont des dispositifs actifs qui émettent un champ magnétique à une fréquence donnée. Elles activent les transpondeurs en leur fournissant l'énergie dont ils ont besoin pour transmettre l'information du code individuel, qui sera associé à la date et l'heure de passage au niveau de la station automatique d'enregistrement, elle-même raccordée à l'antenne. Les données sont téléchargées directement sur un ordinateur connecté ou déchargées sur une clé USB sous format txt. Ce système fonctionne particulièrement bien lorsqu'il est possible de concentrer les poissons vers une voie de passage munie d'une antenne, comme dans le cas de la dévalaison via un exutoire ou dans un cours d'eau peu large et peu profond, et que le système est adaptable dans différentes configurations étant donné que la taille des antennes de détection doit être adaptée à chaque site d'étude. La station de détection RFID permet également un suivi automatisé 24h/24 et 7j/7, dans toutes les conditions météorologiques.

4.2.3. Stations d'enregistrement et antennes RFID

4.2.3.1. Lorcé

L'exutoire de dévalaison est équipé à son entrée d'une antenne de détection rectangulaire de 80x100cm (CIPAM®) qui permet la détection des poissons marqués avec des marques RFID dans un rayon de 30cm. Ce dispositif permet d'identifier chaque individu préalablement marqué lorsqu'il s'approche de l'exutoire. La date et l'heure de la détection sont enregistrées dans une carte mémoire du coffret électronique (CIPAM) qui peut être branché à un ordinateur (figure 27a). De plus, lors du test de l'ajout de l'entonnement à l'entrée de l'exutoire de Lorcé, une seconde antenne (figure 27b) a été placée à l'entrée de l'entonnement (dimensions 1,4m x 0,8m) afin de vérifier la proportion entre les poissons détectés à l'entrée de l'exutoire et les poissons détectés au début de l'entonnement. Cette antenne est constituée de deux boucles de câble 2,5mm² protégé par du tuyau plastique Socarex®.



Figure 27a : Antenne de détection RFID à l'entrée de l'exutoire de Lorcé



Figure 27b : Antenne de détection RFID installée à l'entrée de l'entonnement

Enfin, une antenne a été placée à l'entrée amont de l'échelle à poissons afin de vérifier d'éventuelles tentatives de dévalaison par l'échelle à poissons. Cette antenne de 1,1x 1,5m est constituée de deux boucles de câble 2,5mm² protégée par un tuyau socarex et fixée sur une structure en bois (figure 28).



Figure 28 : Antenne de détection RFID installée à l'entrée amont de l'échelle à poissons de Lorcé

4.2.3.2. Heid de Goreux

Quatre antennes ont été placées sur le site de Heid de Goreux, deux à la fin du débit réservé (8,2km en aval du barrage de Lorcé) et deux dans le du canal de fuite de la centrale hydroélectrique. Le choix de placer 4 antennes (2 x 2) a été décidé pour optimiser les détections sur des largeurs de sites très importantes.

Les deux antennes du débit réservé sont fixées au niveau de l'échancrure formé par l'enrochement (9,8m de large) installé à la fin du débit réservé à Heid de Goreux (figure 29). Elles forment 2 rectangles de 5m x 0,6m placés perpendiculairement par rapport au sens du courant. Elles sont constituées de deux boucles de câble de section 2,5mm², protégées dans un tuyau socarex et fixées sur une structure en corde de 20mm de diamètre. Elles sont prolongées par 4m de câble formant la partie terminale de l'antenne (= la queue). Les deux antennes du canal de fuite (11,8m de large) sont également placées perpendiculairement au sens du courant et soutenues par une corde sur tout le pourtour (figure 30). Elles mesurent chacune 5,5m x 0,6 m et possèdent une queue de 4m de long. Les caractéristiques du cable-socarex sont les mêmes que pour les antennes du débit réservé. Les antennes sont fixées à chaque rive par des pitons ancrés aux structures existantes.

Chacune des antennes via sa « queue » est reliée à un boîtier d'accord RFID de marque CIPAM. Ces boîtiers placés en hauteur, sont eux-mêmes reliés aux stations d'enregistrement RFID par un câble coaxial double brin blindé de 20m de long (figure 31). Les deux stations sont placées en aval de la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux et chaque station a la capacité de faire fonctionner simultanément deux antennes. Les 4 antennes de Heid de Goreux ont été numérotées de la rive gauche à la rive droite de 1 à 4 afin de faciliter leur identification. Les antennes du canal de fuite sont donc les antennes 1 et 2 et les antennes du débit réservé, représentent les antennes 3 et 4 (figure 32).



Figure 29 : Vue amont des deux antennes de détection RFID installées à la fin du débit réservé à Heid de Goreux



Figure 30 : Vue amont des deux antennes de détection RFID installées à la sortie du canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Heid de Goreux

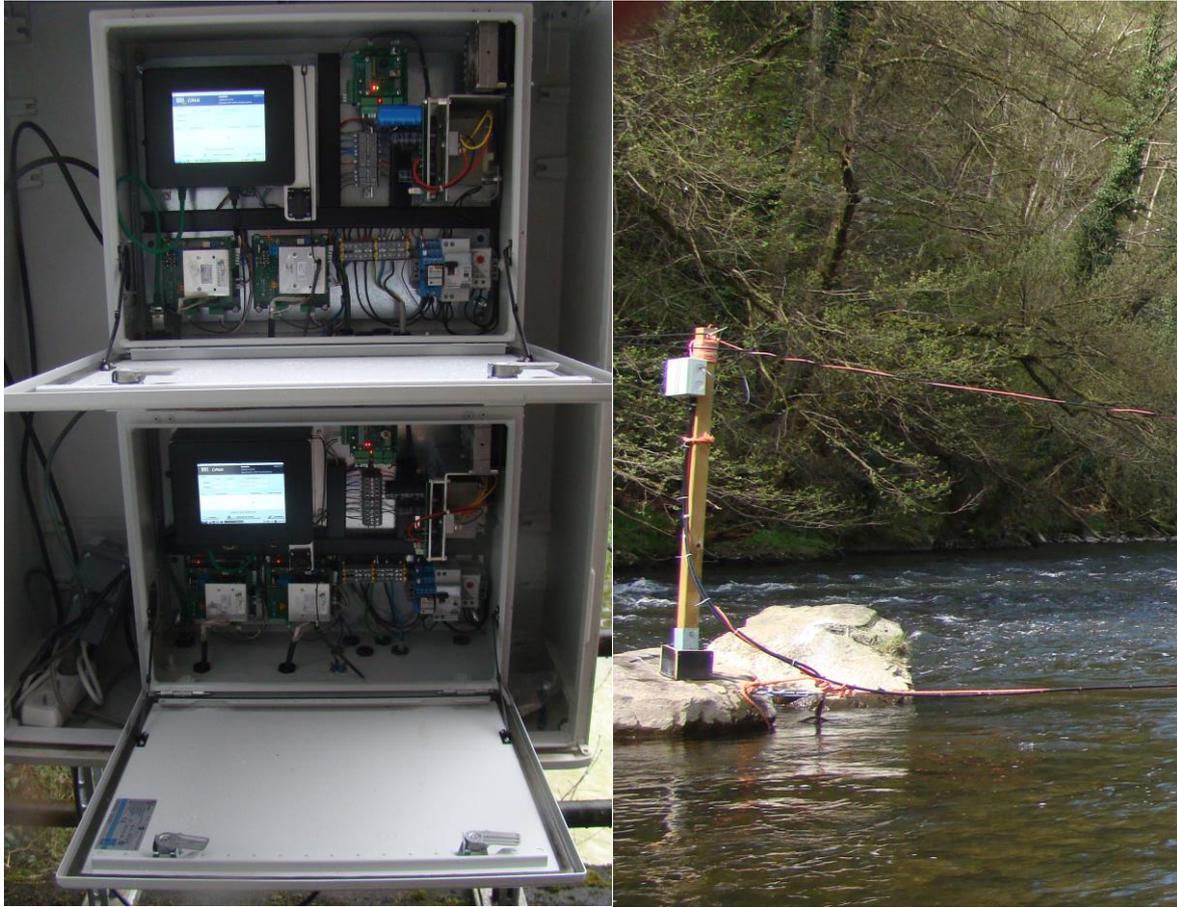


Figure 31 : Stations de détection automatiques CIPAM (à gauche) et poteau en bois soutenant le boîtier d'accord RFID (à droite)



Figure 32 : Vue amont du dispositif de détection installé à Heid de Goreux avec les antennes 1 et 2 (canal de fuite : sortie des turbines) et les antennes 3 et 4 (fin du débit réservé)

4.2.4. Marquage et déversements des poissons

4.2.4.1. Marquage

Le 3/02/2016, 850 smolts de saumon atlantiques en provenance de la pisciculture d'Erezée du SPW ont été marqués avec des transpondeurs de marques Texas Instrument® HDX de 32mm (figure 33). Pour chaque marquage, une incision de maximum 5mm est effectuée à l'aide d'un scalpel, au niveau de la cavité abdominale, sur les poissons préalablement endormis à l'Eugénol (0,2ml/l) pour permettre l'insertion de la marque. Ce marquage ne nécessite pas de points de suture et les poissons sont placés quelques minutes dans une bassine d'eau fraîche, afin de leur permettre de récupérer suite à l'anesthésie. Les poissons marqués sont ensuite placés en stabulation dans des bassins de la pisciculture avant leur déversement au printemps. Seuls les poissons de plus de 120mm à la fourche ont été marqués afin que l'émetteur ne dépasse pas 2% de la masse du poisson. Au-dessus de cette limite, on pourrait observer un impact potentiel sur le comportement (Jepsen et al., 2002).



Figure 33 : Smolt de saumon avec un transpondeur RFID 32mm

4.2.4.2. Déversements

Les déversements de smolts ont été effectués à deux dates distinctes afin de tester séparément l'abaissement partiel de la vanne mobile du barrage en continu (du 11/04/2016 au 18/04/2016) et l'installation de l'entonnement (du 20/04/2016 au 27/04/2016) à l'entrée de l'exutoire de Lorcé (figure 34):

- Le **11/04/2016 (déversement 1)**, 300 individus ont été déversés à Targnon à 3,75km (figure 35) en amont du barrage de Lorcé afin de tester l'impact de l'abaissement partiel d'une des deux vannes mobiles du barrage de Lorcé sur l'efficacité de l'exutoire et sur l'utilisation des différentes voies de passage. De plus 50 individus ont été

déversés directement à 200m en aval du barrage de Lorcé afin d'étudier l'impact du débit réservé (8,2km).

- Le **20/04/2016 (déversement 2)**, 300 individus ont été déversés à Targnon en amont du barrage de Lorcé (3,75km) afin de tester l'efficacité de l'entonnement et de vérifier les différentes voies de passage. Au niveau du débit réservé, 3 lots différents ont été déversés à 3 distances différentes du barrage de Lorcé afin de mieux appréhender l'impact réel du débit réservé sur la dévalaison des smolts dans ce tronçon. Le premier lot (n=50) a été déversé à 200m en aval du barrage de Lorcé, le second lot (n=50) a été déversé aux Fonds de Quareux (figure 36) à 3,8km en aval du barrage de Lorcé (4,6km en amont de Heid de Goreux) et le troisième lot (n=61) a été déversé à Nonceveux (figure 37) à 5,8km en aval du barrage de Lorcé (2,6km en amont de Heid de Goreux).

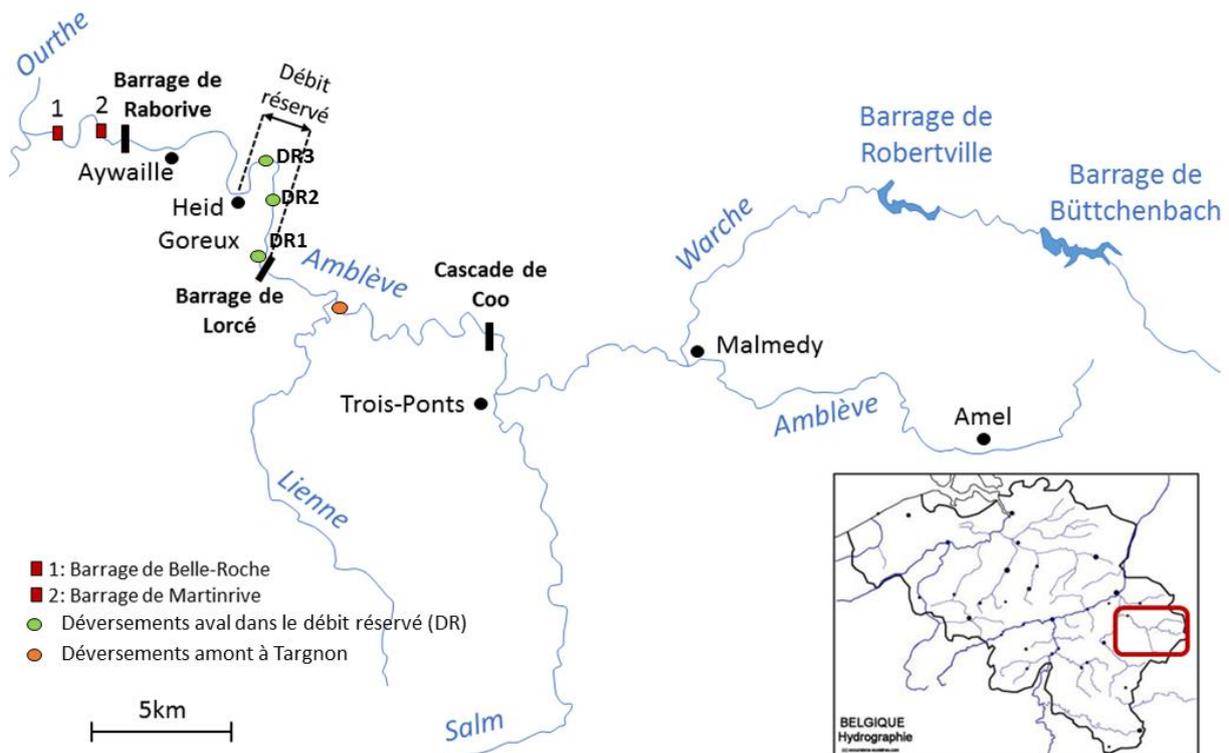


Figure 34 : Localisation géographique et tracé de l'Amblève incluant les principaux affluents et obstacles ainsi que les sites de déversement pour 2016 : déversement amont à Targnon à 3,75km (orange) ; déversement à Lorcé dans le débit réservé (DR1 à 200m en aval du barrage de Lorcé ; déversement aux Fond de Quareux (DR2 à 3,8km en aval du barrage de Lorcé) et déversement à Nonceveux à 5,8km en aval du barrage de Lorcé (DR3)



Figure 35 : Déversement de smolts de saumon atlantique (à gauche) sur le site de Targnon à 3,75km en amont du barrage de Lorcé (à droite)



Figure 36 : Site de déversement aux Fonds de Quareux à 3,8km en aval du barrage de Lorcé dans le débit réservé (DR2)



Figure 37 : Site de déversement à Nonceveux à 5,8km en aval du barrage de Lorcé dans le débit réservé (DR3)

4.2.5. Systèmes de capture en dévalaison

4.2.5.1. Lorcé

Le piège de capture de dévalaison aménagé au barrage de Lorcé (figure 38) a été contrôlé de 2 à 5 fois par semaine durant la période d'étude. Les individus capturés sont endormis à l'Eugénol (0,1ml/l), identifiés, mesurés et pesés. Les marques individuelles sont scannées à l'aide d'un lecteur manuel. Les poissons ont été relâchés en aval du barrage dans le débit réservé en prenant soin de noter la date et l'heure du déversement.



Figure 38 : Piège de capture de dévalaison installé au niveau de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé

4.2.5.2. Méry

Un second piège de dévalaison, contrôlé dans le cadre du projet Saumon-Meuse (Ovidio et al., 2015) est présent sur le parcours de dévalaison des smolts. En effet, l'exutoire de dévalaison situé à Méry (figure 39), sur l'Ourthe, est muni d'un piège de capture. Ce site situé à 42km en aval de Lorcé et 34km de Heid de Goreux est caractérisé par la présence d'un barrage rampe et d'un canal d'amenée qui alimente une centrale hydroélectrique. Le passage vers l'aval est possible par le barrage, les turbines et l'exutoire. Ce piège de capture permet d'obtenir des données sur les temps et vitesses de migration sur une portion de rivière moins fragmentée et sur le devenir des smolts déversés sur l'Amblève. Le mode opératoire pour le monitoring des individus capturés est le même que pour Lorcé.



Figure 39 : Site de Méry (Ourthe) équipé d'un barrage rampe (à gauche) et d'un exutoire de dévalaison muni d'un piège de capture (à droite) au niveau de la centrale hydroélectrique de Méry

4.2.6. Détection des voies de passage

L'identification des voies de passage se fait via les antennes de détection RFID de Lorcé et de Heid de Goreux ainsi que grâce aux deux pièges de capture, Lorcé sur l'Amblève et Méry sur l'Ourthe. Plusieurs cas de figure sont possibles d'un point de vue détection et capture (figure 40).

Lors de l'abaissement partiel de la vanne mobile (déversement du 11/04/2016) :

- un poisson peut être détecté à l'antenne de l'entrée de l'exutoire (n°9). Il peut ensuite être capturé dans le piège s'il a effectivement emprunté l'exutoire (n°11)
- un poisson peut être détecté aux antennes 1 et 2 placées à la sortie du canal de fuite de Heid de Goreux (n°15), s'il emprunte le tunnel d'amenée à Lorcé et donc les turbines de Heid de Goreux (n°6 et 16)
- un poisson peut être détecté aux antennes 3 et 4 placées à la fin du débit réservé à Heid de Goreux (n°18), s'il a emprunté la vanne mobile du barrage de Lorcé (n°1) ou l'exutoire (n°9 et 11).

Lors de l'installation de l'entonnement (déversement du 20/04/2016)

- un poisson peut être détecté à l'antenne de l'entrée de l'exutoire et de l'entonnement (n°9). Il peut ensuite être capturé dans le piège s'il a effectivement emprunté l'exutoire (n°11)
- un poisson peut être détecté aux antennes 1 et 2 placées à la sortie du canal de fuite de Heid de Goreux (n°15), s'il emprunte le tunnel d'amenée à Lorcé et donc les turbines de Heid de Goreux (n°6 et 16)
- un poisson peut être détecté aux antennes 3 et 4 placées à la fin du débit réservé à Heid de Goreux (n°18), s'il a emprunté la microturbine de Lorcé (n°7) ou l'exutoire (n°11).

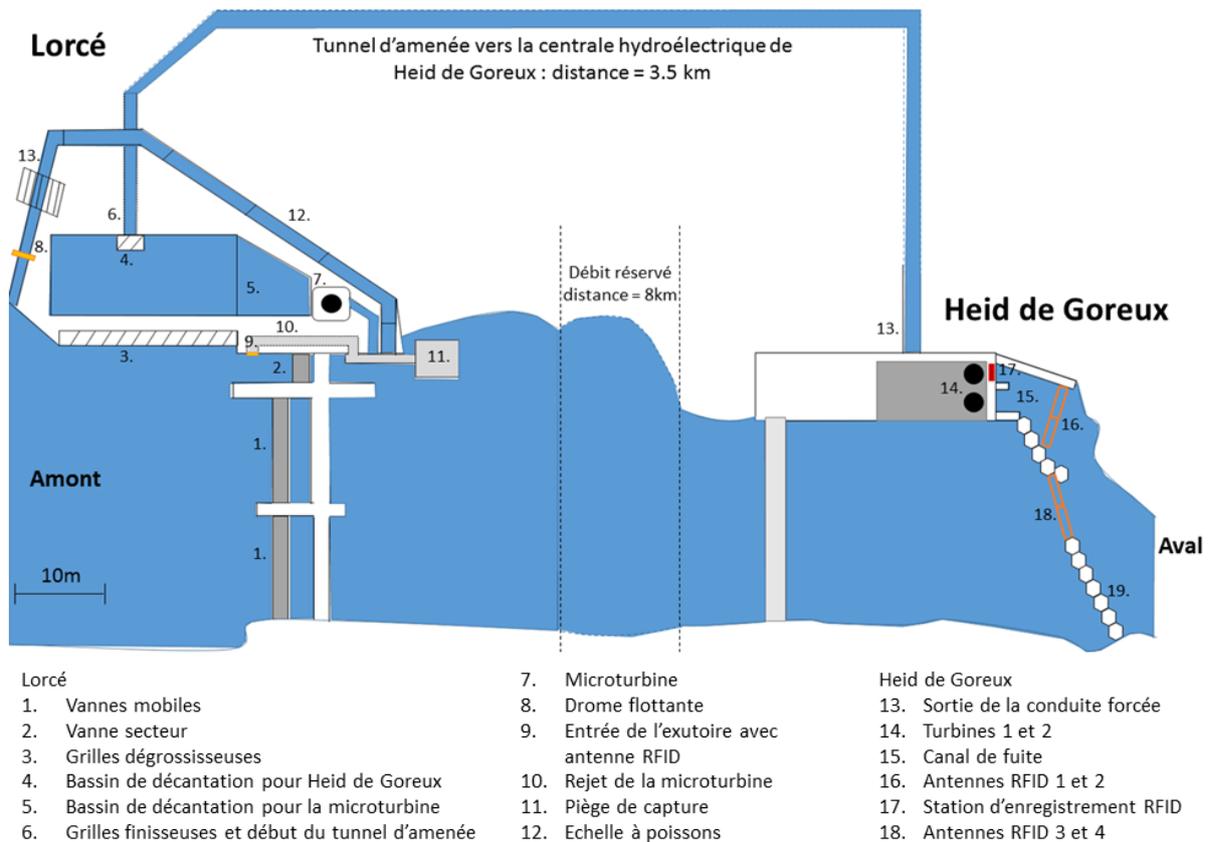


Figure 40 : Représentation schématique du complexe hydroélectrique de Lorcé-Heid de Goreux et des voies de passages potentielles pour les smolts : les vannes mobiles (1.), le tunnel d'amenée des turbines (6.) amenant à l'usine de turbinage de Heid de Goreux (13.), l'exutoire (9.) et la microturbine (7.). Les détections se font aux antennes de l'exutoire (9.), de l'échelle à poissons (8.), de la fin du débit réservé (18.) et du canal de fuite (16.).

4.2.7. Obtention des données environnementales et de turbinage

Les données du débit pour le barrage de Lorcé ont été obtenues grâce au site Aqualim (SPW-DCENN). Nous avons additionné la moyenne journalière du débit de la station de La Gleize pour l'Amblève et celle de la station de Lorcé pour la Lienne afin de connaître le débit au barrage de Lorcé, situé en aval de ces deux stations. La température à Lorcé a été obtenue grâce au relevé d'un enregistreur automatique de température (Onset TidBit) placé par le LDPH-ULg au niveau du barrage de Lorcé. Les données de turbinage (turbines principales et microturbine), de positionnement des vannes et des variations de la hauteur du plan d'eau de Lorcé ont été gracieusement mises à notre disposition par Electrabel propriétaire et exploitant du complexe hydroélectrique de Lorcé-Heid de Goreux.

4.3. Résultats

4.3.1. Conditions expérimentales

4.3.1.1. Température et débit

La température moyenne journalière de l'Amblève à Lorcé au printemps 2016 (figure 41) a augmenté continuellement dépassant le seuil de 8°C pour la première fois de l'année le 27 mars 2016. Des variations parfois importantes de l'ordre de plusieurs degrés aussi bien dans le sens positif que dans le sens négatif se sont produites durant la période d'étude. Le printemps 2016 a été relativement frais par rapport aux années précédentes, avec un maximum de 14,2°C observé le 28 mai 2016. Notons la forte variation de température fin avril avec une diminution de plus de 5°C suivie d'une augmentation rapide de 8°C en une dizaine de jours.

Le débit moyen journalier de l'Amblève au printemps (figure 41) présente un profil différent des années précédentes de suivis avec globalement une phase de diminution coupée d'augmentations parfois importante : fin février (>60m³/s), début avril (>30m³/s), début mai (>20m³/s) et fin mai (>20m³/s). Pour rappel, le module de l'Amblève est 19,2m³/s.

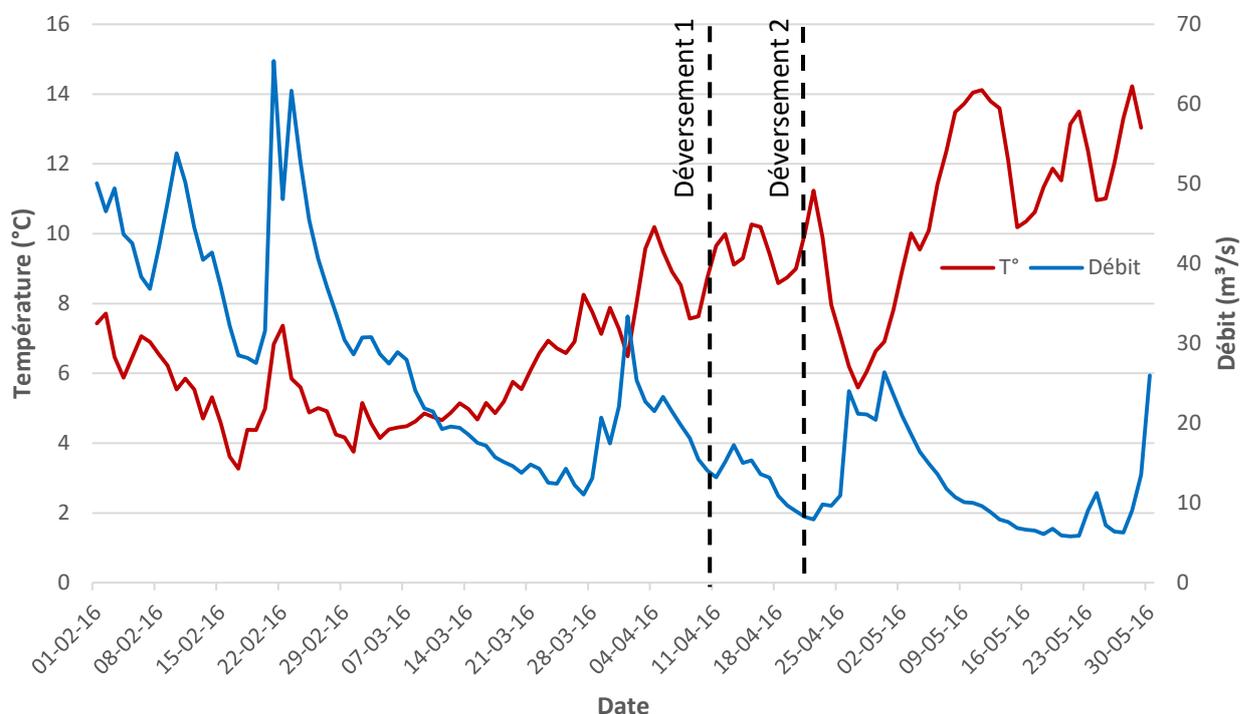


Figure 41 : Evolution de la température (°C) et du débit (m³/s) au niveau du barrage de Lorcé (Amblève) durant le printemps 2016. Les dates de déversement des smolts sont représentées par les lignes en pointillées

4.3.1.2. Abaissement des vannes mobiles, fluctuations du plan d'eau amont du barrage de Lorcé et fonctionnement des turbines

Le barrage de Lorcé est équipé de deux vannes mobiles dont la position est réglée automatiquement selon le débit de la rivière. Lors d'augmentations du débit supérieures à 30m³/s (capacité maximum de turbinage des turbines de la centrale de Heid de Goreux), une ou deux vannes s'abaisse(nt), ce qui a pour conséquence de faciliter le passage des poissons vers l'aval sans utiliser l'exutoire de dévalaison. Durant les suivis comportementaux printaniers par technologie RFID, les vannes 1 et 2 ont été abaissées:

- Du 01/03/16 au 08/03/16 : abaissement partiel (1/3) de la vanne 1
- Du 31/03/16 au 03/04/16 : abaissement partiel (1/2) de la vanne 2
- Du 11/04/16 au 18/04/16 : abaissement partiel (1/3) de la vanne 2 prévu dans le suivi comportemental de smolt ce printemps 2016.

Mise à part l'abaissement de la vanne 2 « provoqué » du 11/04/2016 au 18/04/16 pour le premier déversement de smolts, les autres abaissements se sont déroulés en dehors de la période de suivi.

Le niveau du plan d'eau amont du barrage de Lorcé peut changer selon les variations de débits de l'Amblève mais également selon le mode de fonctionnement de la centrale de Heid de Goreux. En effet, lors de faibles débits, les turbines de Heid de Goreux peuvent fonctionner par intermittence en vidant le plan d'eau lors du turbinage et en le laissant se remplir lors de l'arrêt des turbines. Cette variation du niveau, appelé marnage, entraîne une variation du débit entrant dans l'exutoire de dévalaison qui est placé en surface, comme ce fut observé au printemps 2014 et 2015. Suite à ce problème d'alimentation de l'exutoire, il a été convenu avec Electrabel d'augmenter de 10cm la valeur maximum (=altitude) du niveau du plan d'eau de 178,9m en 2014 à 179m et de diminuer la variation du plan d'eau (0,3m) en 2015. Il faut noter que les conditions climatiques pluvieuses de ce printemps 2016 n'ont pas engendré de phénomène de marnage durant ce suivi (plan d'eau à 179m d'altitude en permanence).

Le fonctionnement des turbines sur le complexe de Heid de Goreux a été variable selon la turbine (figure 42). La première turbine de Heid de Goreux a fonctionné en permanence durant le printemps 2016. En revanche, la seconde turbine a été mise à l'arrêt à plusieurs reprises durant la période de suivi :

- Du 23 mars au 28 mars 2016
- Du 11 avril au 25 avril 2016 (période de suivi)
- Du 6 mai au 30 mai 2016.

La troisième turbine du complexe hydroélectrique Lorcé-Heid de Goreux qui est la microturbine de Lorcé (alimentant le débit réservé), a fonctionné normalement durant tout le printemps mis à part du 11/04/2016 au 19/04/2016. En effet cette semaine correspondait au test de l'abaissement d'une vanne mobile du barrage de Lorcé sur la dévalaison des smolts où la microturbine a été arrêtée afin de laisser passer l'eau du débit réservé par une vanne mobile.

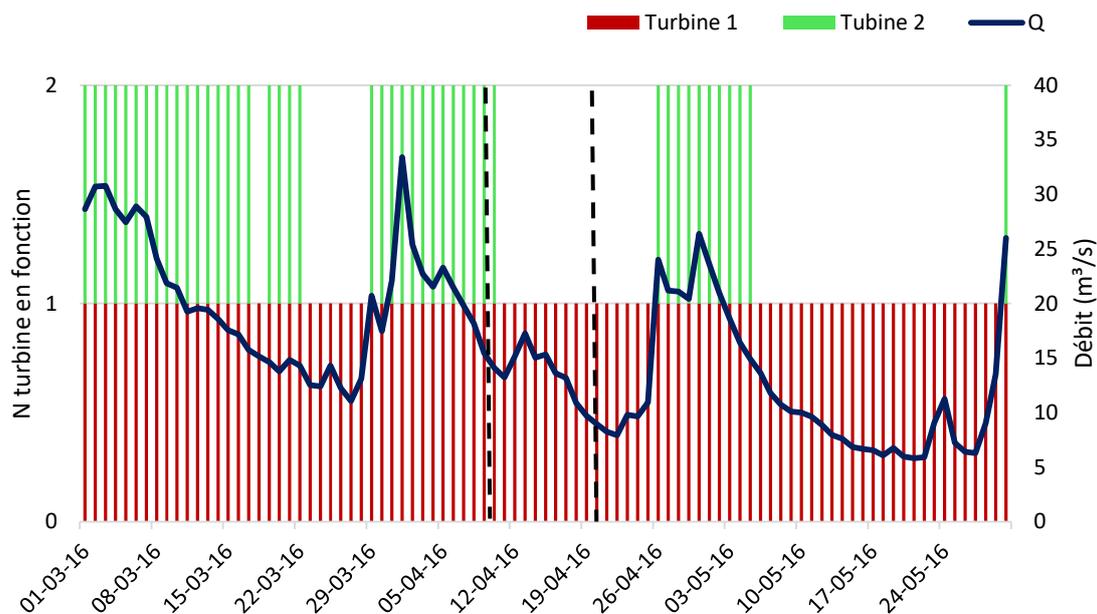


Figure 42 : Période de fonctionnement des deux turbines de Heid de Goreux en lien avec le débit de l'Amblève et l'indication des deux dates de déversement (lignes en pointillées)

4.3.2. Arrivée des poissons à l'entrée de l'exutoire du barrage Lorcé

4.3.2.1. Mesure de l'attractivité de l'exutoire de dévalaison

Lors du **premier déversement (abaissement partiel de la vanne mobile)**, parmi les 300 smolts de saumon atlantiques marqués et déversés en amont du barrage de Lorcé, n=76 ont été détectés à l'entrée de l'exutoire de dévalaison. Le taux d'attractivité de l'exutoire de dévalaison est donc de 25%. Lors du **deuxième déversement (présence de l'entonnement)**, parmi les 300 smolts de saumon atlantiques marqués et déversés en amont, n=188 ont été détectés à l'entrée de l'entonnement et n=134 ont été détecté en l'entrée de l'exutoire (fin de l'entonnement). Le taux d'attractivité de l'entrée de l'entonnement est de 63% et le taux d'attractivité de l'entrée de l'exutoire de dévalaison est de 45%.

4.3.2.2. Date de première détection au niveau de l'exutoire

Lors du premier déversement (11/04/16 : vanne ouverte), le premier smolt a été détecté à l'entrée de l'exutoire le soir même de son déversement après 8h. En moyenne, les smolts ont

été détectés 1,5 jours après leur déversement (médiane=1,5 jours et maximum=5,5 jours) ce qui représente une période de détection à l'entrée de l'exutoire du 11/04/16 au 17/04/16 (figure 43). Pour le déversement 2 (20/04/16 : entonnement), le premier smolt a été détecté le jour même du déversement après 9h devant l'exutoire de dévalaison. En moyenne, les smolts ont été détectés un jour après leur déversement (médiane=1,5 jours et maximum=5,5 jours) ce qui représente une période de détection devant l'exutoire du 20/04/16 au 26/04/16.

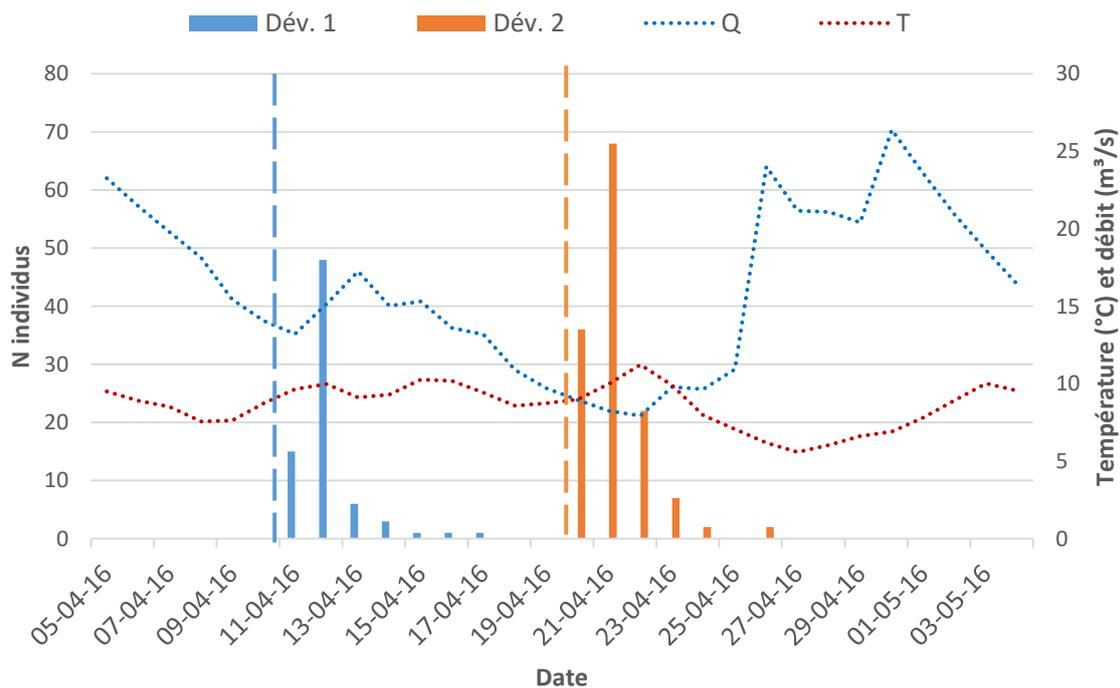


Figure 43 : Nombre d'individus détectés pour la première fois (date d'arrivée) à l'approche de l'exutoire de dévalaison de Lorcé. Les lignes pointillées verticales correspondent aux dates de déversement

4.3.2.3. Heure de première détection à l'approche de l'exutoire

Pour les deux déversements, la première détection de chaque smolt à l'approche de l'exutoire de dévalaison a été observée (figure 44) lors de phase nocturne de 20h à 6h: 97% lors du premier déversement et 95% lors du deuxième déversement. On constate également que pour le deuxième déversement, la répartition du nombre d'individus détectés par heure pour la première fois à l'entrée de l'entonnement et à l'entrée de l'exutoire est la même (χ^2 , $p < 0,001$). Les pics de première détection pour les deux déversements ainsi qu'à l'entrée de l'entonnement et de l'exutoire lors du deuxième déversement se déroulent entre 23h et 00h. Enfin, pour les individus du 2^{ème} déversement détectés à la fois à l'entrée de l'entonnement et à l'entrée de l'exutoire (utilisation de l'entonnement), le calcul du temps entre la première détection à l'entrée de l'entonnement et celle à l'entrée de l'exutoire nous permet d'étudier

le temps d'hésitation à utiliser l'entonnement. La médiane de ce temps d'hésitation est <5s avec un maximum de 74h (figure 45).

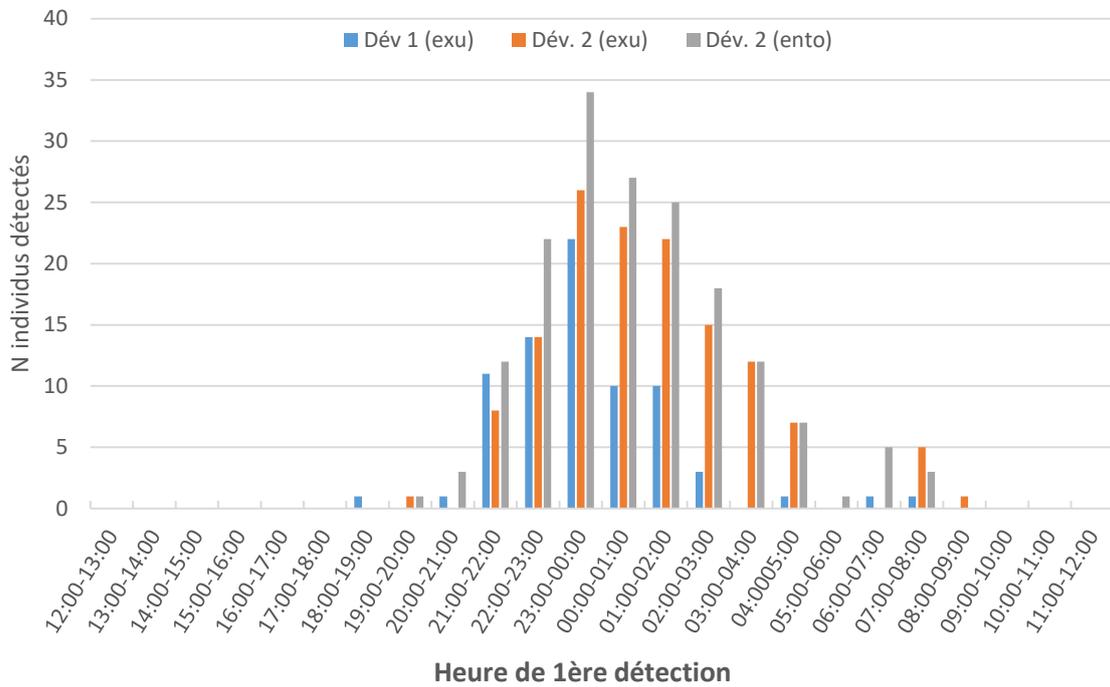


Figure 44 : Nombre d'individus détectés par heure pour la première fois à l'approche de l'exutoire de dévalaison selon le déversement et pour l'entonnement lors du second déversement

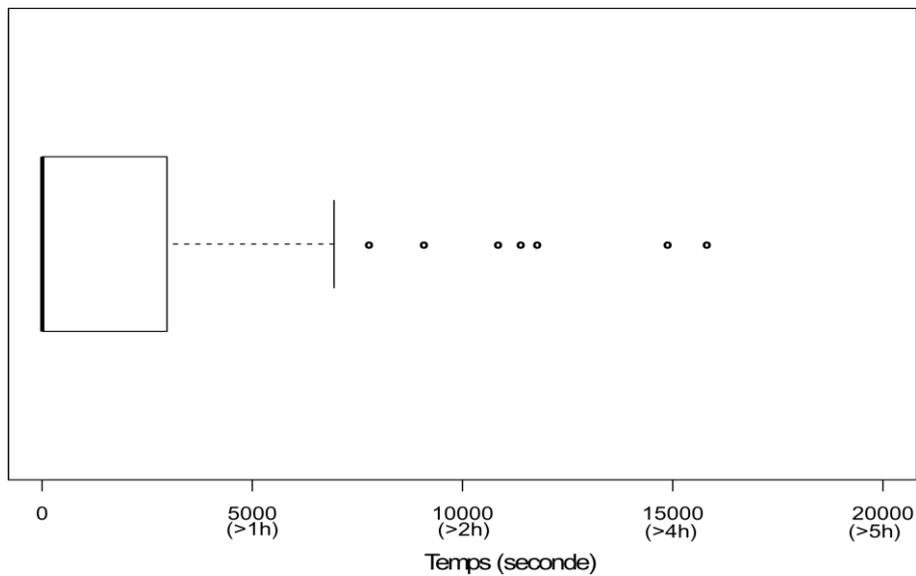


Figure 45 : Boite de dispersion des temps calculés entre la première détection à l'entrée de l'entonnement et la première détection à l'entrée de l'exutoire

4.2.3.4. Rythme nycthéral à l'entrée de l'exutoire

L'analyse de l'activité (nombre total de détection) devant l'entrée de l'exutoire et/ou l'entonnement montre également une activité globalement nocturne (21h-7h) avec >90% pour les deux déversements ainsi que devant l'entonnement pour le déversement 2 (figure 46).

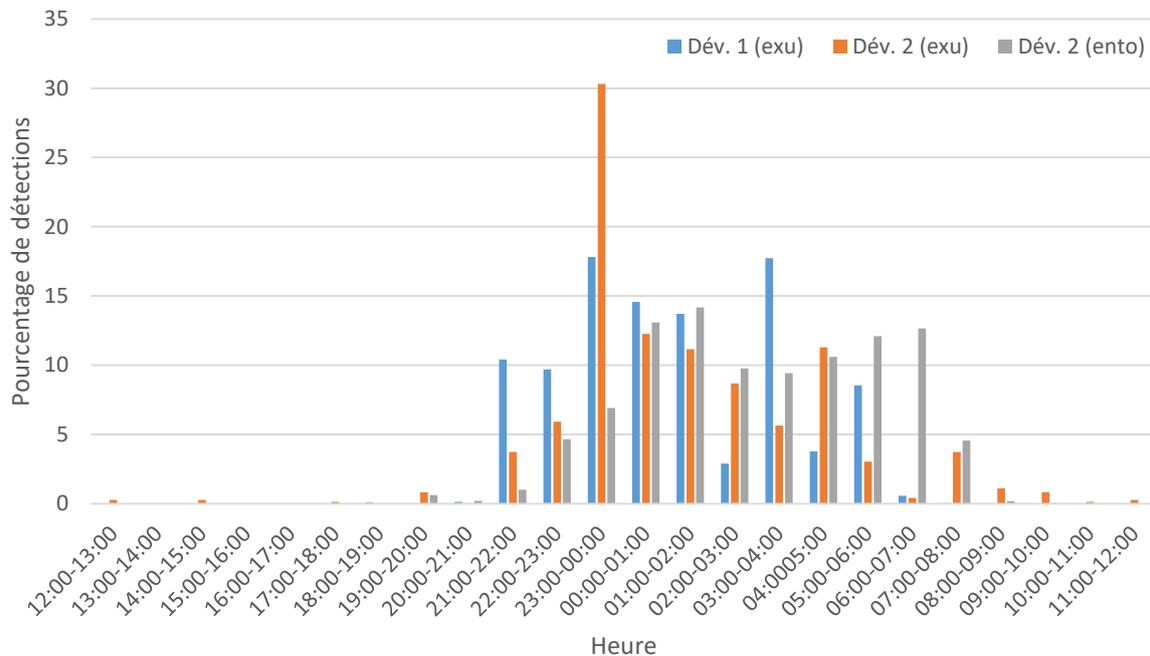


Figure 46 : Pourcentage de détections totales au niveau de l'exutoire de dévalaison de Lorcé selon les différents déversements

4.3.3. Mesure de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé

Lors du test de l'abaissement partiel d'une des deux vannes mobiles du barrage de Lorcé (déversement 1 le 11/04/16), parmi les 300 individus déversés en amont du barrage de Lorcé, n=76 ont été détectés à l'entrée de l'exutoire (**pas d'entonnement**) et n=34 ont été capturés dans le piège de dévalaison et ont donc emprunté l'exutoire (tableau 3). Le pourcentage d'efficacité réel est de 12% et le pourcentage d'efficacité corrigée est de 45%.

Lors du test avec la mise en place d'un entonnement à l'entrée de l'exutoire (déversement 2 le 20/04/16), parmi les 300 individus déversés en amont du barrage de Lorcé, n=188 ont été détectés à l'entrée de l'entonnement dont n=134 à l'entrée de l'exutoire et n=97 ont été capturés dans le piège de dévalaison. Le pourcentage d'efficacité réelle est de 32%, le pourcentage d'efficacité corrigée par rapport à l'entrée de l'exutoire est de 72% et celui par rapport à l'entrée de l'entonnement est de 52%.

Tableau 3 : Données de détection et de capture au niveau de l'exutoire de Lorcé par déversement avec la date de déversement, le nombre de poissons marqués et déversés en amont du barrage de Lorcé, détectés à l'entrée de l'entonnement et de l'exutoire, capturés dans le piège de dévalaison ainsi que le pourcentage d'efficacité réelle et corrigée

Déversements	N marqués	N détectés à l'entrée de l'entonnement	N détectés à l'entrée de l'exutoire	N capturés	% efficacité réelle	% efficacité corrigée
1. 11/04/16 (abaissement vanne mobile)	300	-	76	34	12%	45%
2. 20/04/16 (entonnement)	300	188	134	97	32%	72%

4.3.4. Temps de présence au niveau de l'exutoire de dévalaison

Les temps de présence devant l'entrée de l'exutoire de dévalaison et de l'entonnement sont déterminés en calculant la durée entre la première et la dernière détection au niveau de la même antenne (figure 47). Lors du premier déversement (11/04/16 : vanne mobile abaissée), le temps de présence à l'entrée de l'exutoire de dévalaison était inférieur à 30 minutes pour plus de 75% des smolts capturés (médiane= 1s) et ceux non capturés (médiane= 7min). Cependant la distribution des données de temps de présence à l'entrée de l'exutoire est significativement différente entre ceux capturés dans le piège et ceux non capturés dans le piège (test de Chi², p=0,02). Le temps de présence devant l'exutoire pour les individus détectés-capturés est majoritairement compris entre 5min et 30min alors que les individus détectés et non capturés ont un temps de présence généralement inférieur à 1 minute.

Lors du deuxième déversement (20/04/16 : entonnement), le temps de présence à l'entrée de l'entonnement était inférieur à 5h pour plus de 70% des smolts capturés (médiane= 19min) et ceux non capturés (médiane= 20min). Quant à l'entrée de l'exutoire, ce temps de présence était inférieur à 5min pour plus de 65% des smolts capturés (médiane <1s) et ceux non capturés (médiane = 2s). Les temps de présence à l'entrée de l'exutoire et à l'entrée de l'entonnement ne sont pas significativement différents entre les individus qui ont été capturés dans le piège de dévalaison et les individus seulement détectés (test de chi²: p > 0,05).

Les temps de présence sont indépendants de la taille du poisson qui se retrouve face à l'entrée du dispositif de franchissement. En effet, dans les 3 conditions expérimentales (entrée de l'exutoire sans entonnement, entrée de l'exutoire avec entonnement et entrée de l'entonnement), aucun lien significatif n'a été observé entre la taille du poisson et son temps de latence (Régression linéaire, p>0,05).

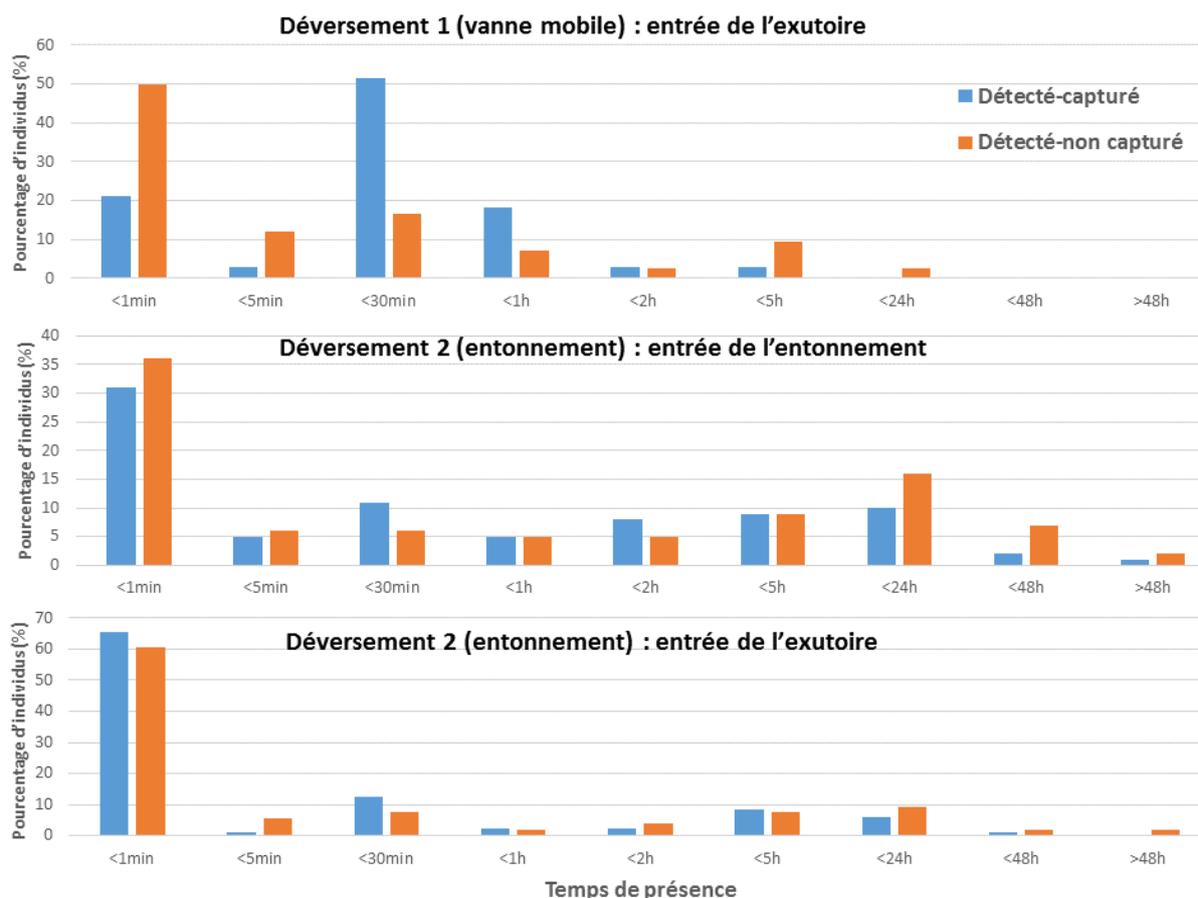


Figure 47 : Pourcentage du nombre d'individus selon différentes catégories de temps de présence proche de l'exutoire de dévalaison. Résultats pour le premier déversement à l'exutoire (en haut), pour le second déversement à l'entrée de l'entonnement et pour le second déversement à l'entrée de l'exutoire

4.3.5. Analyse quantitative des voies de passage utilisées par les smolts

Les résultats des années précédentes ont démontré que certains smolts utilisaient d'autres voies de passage que l'exutoire de dévalaison. La campagne de suivi de 2015 a confirmé via un réseau d'antennes RFID que les autres voies de passage lorsque les vannes mobiles du barrage de Lorcé sont relevées, sont le canal d'amenée vers les turbines de Heid de Goreux et la micro-turbine de Lorcé (alimentant le débit réservé en aval de Lorcé). Afin d'affiner les données de 2015, un suivi complémentaire a été réalisé en 2016 et les résultats sont donnés par déversement.

4.3.5.1. Déversements en amont du barrage de Lorcé

Lors du déversement du 11/04/2016, lorsqu'une vanne mobile du barrage de Lorcé était abaissée partiellement (micro-turbine de Lorcé arrêtée), 300 individus ont été déversés en amont du barrage de Lorcé (figure 48). Au total, N=76 individus (25% du total) ont été détectés à l'entrée de l'exutoire de Lorcé dont N=1 a été détecté à l'entrée amont de l'échelle à poissons de Lorcé. Parmi ceux-ci, N=34 (11% du total) ont emprunté l'exutoire de dévalaison

de Lorcé et ont été capturés dans le piège de dévalaison (dont N=2 ont été retrouvés mort), ce qui représente 45% des individus détectés à l'entrée de l'exutoire. Après le monitoring du piège de dévalaison, les poissons sont relâchés en aval du barrage dans le débit réservé. N=15 individus ont été détectés à la sortie du débit réservé à Heid de Goreux (47% des individus capturés dans le piège de dévalaison et déversés en aval) dont N=1 individu a ensuite été capturé dans le piège de dévalaison de Méry sur l'Ourthe. Les turbines de Heid de Goreux ont été utilisées comme voie de passage par N=55 individus (18% du total) dont N=11 (20% des individus qui ont emprunté les turbines comme voie de passage) ont été préalablement détectés à l'entrée de l'exutoire sans l'utiliser et N=1 a été capturé à Méry. N=36 individus ont utilisé la vanne mobile comme voies de passage dont N=5 ont été détectés au préalable à l'entrée de l'exutoire et N=2 ont été capturés à Méry. Enfin N=6 individus ont été capturés à Méry sans être détecté à Lorcé et/ou à Heid de Goreux.

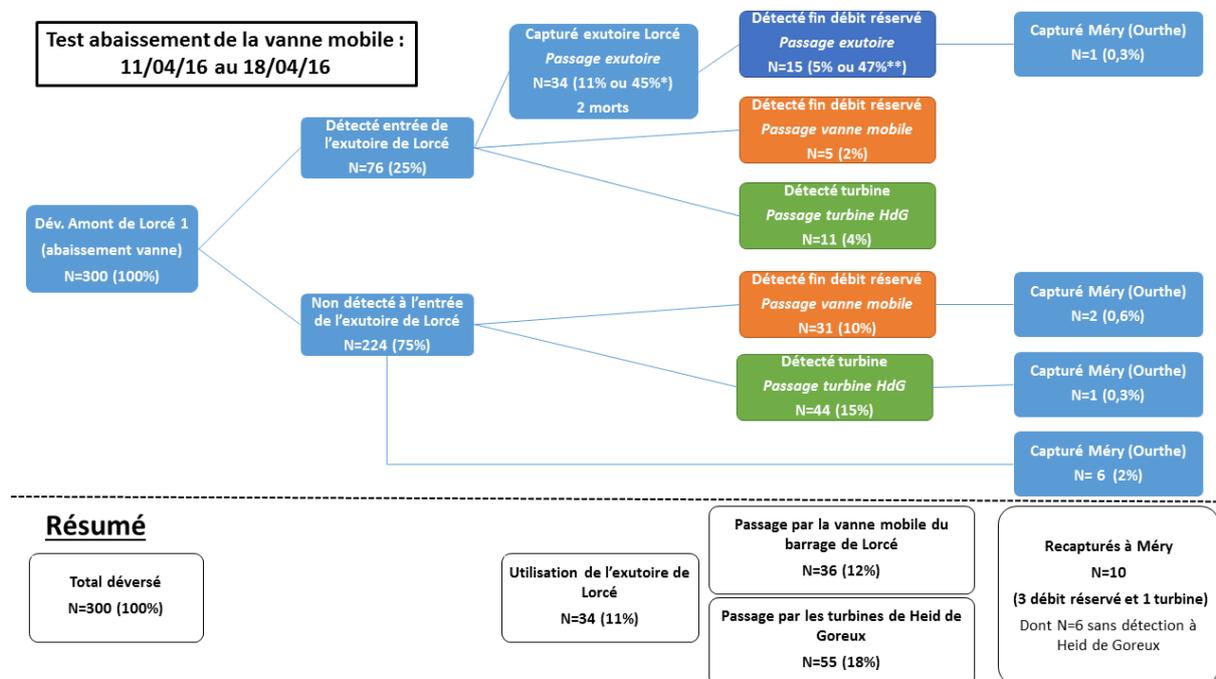


Figure 48 : schéma des voies de passage utilisées par les poissons du premier déversement en amont du barrage de Lorcé lors du test de l'abaissement d'une vanne mobile

Lors du deuxième déversement (aménagement d'un entonnement à l'entrée de l'exutoire de dévalaison), la vanne mobile était relevée et la micro-turbine qui alimente le débit réservé fonctionnait. Sur les 300 individus déversés le 20/04/16 (figure 49), N=188 individus (63% du total) ont été détectés à l'entrée de l'entonnement dont N=5 ont été détectés avant ou après à l'entrée de l'échelle à poissons de Lorcé. Parmi ceux-ci, N=134 ont emprunté l'entonnement jusqu'à l'entrée de l'exutoire (45% du total ou 71% des individus détectés à l'entrée de l'entonnement) et N=97 individus ont été capturés dans le piège de dévalaison de Lorcé (32%

du total ou 72% des individus détectés à l'entrée de l'exutoire) dont N=2 détectés à l'entrée de l'échelle à poissons. Ensuite, N=32 ont été détectés à la fin du débit réservé à Heid de Goreux, soit 35% des individus capturés et relâchés en aval du barrage de Lorcé mais N=2 individus ont été capturés à Méry (Ourthe) sans être détecté à la fin du débit réservé. Les turbines de Heid de Goreux ont été utilisées comme voie de passage par N=37 (12% du total) individus (N=13 ont été détectés à l'entrée de l'entonnement et l'entrée de l'exutoire, N=7 détectés uniquement à l'entrée de l'entonnement et N=17 sans détection au niveau de l'exutoire-entonnement) dont N=2 détectés à l'entrée de l'échelle à poissons de Lorcé avant. Parmi les individus qui ont emprunté les turbines de Heid de Goreux, N=5 ont été capturés à Méry par la suite. N=38 ont utilisé la micro-turbine de Lorcé comme voie de passage pour être détectés ensuite à la fin du débit réservé à Heid de Goreux. Parmi ces 38 individus (dont N=6 capturés à Méry), N=13 ont été détectés à l'entrée de l'entonnement et de l'exutoire, N=13 uniquement à l'entrée de l'entonnement et N=12 aucune détection avant Heid de Goreux. N=6 individus ont été détectés à l'entrée amont de l'échelle à poissons de Lorcé dont N=2 ont utilisé les turbines de Heid de Goreux comme voie de passage. Enfin N=5 ont été capturés à Méry sans être détectés à Heid de Goreux ni passés par l'exutoire de dévalaison de Lorcé.

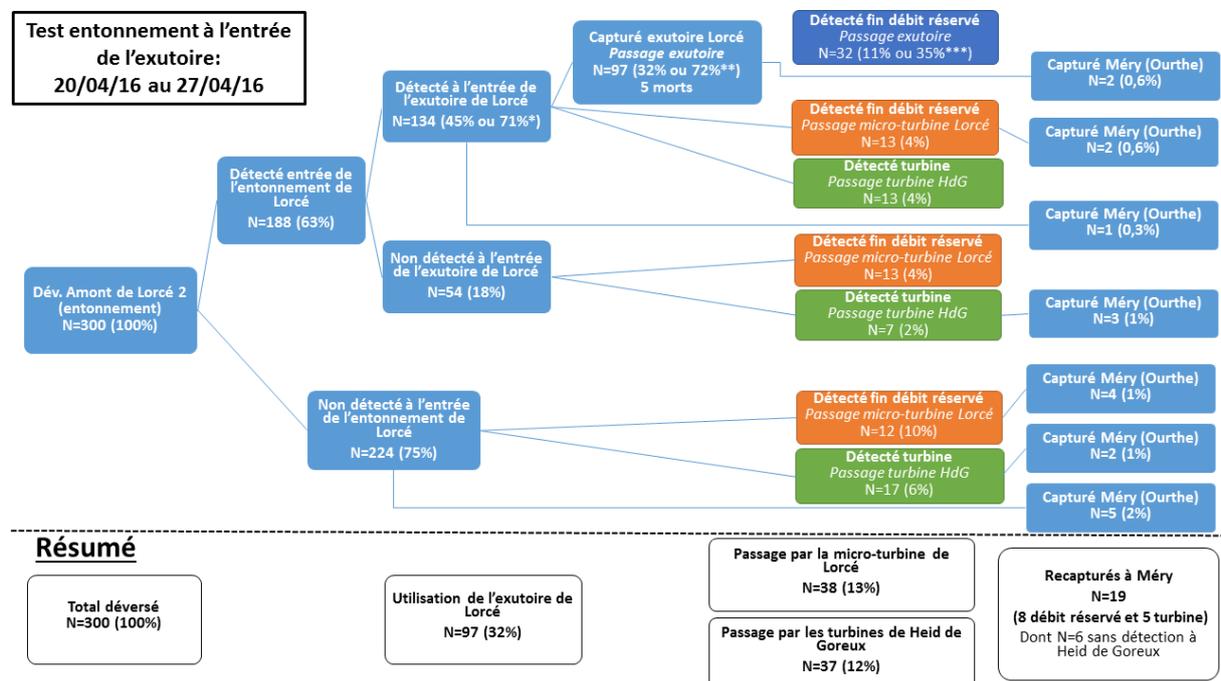


Figure 49 : schéma des voies de passage utilisées par les poissons du second déversement en amont du barrage de Lorcé lors du test d'entonnement à l'entrée de l'exutoire de Lorcé

4.5.3.2. Déversements dans le débit réservé en aval du barrage de Lorcé

A chaque déversement en amont du barrage de Lorcé, un certain nombre d'individus ont été utilisés comme témoins et déversés directement dans le débit réservé afin de vérifier son impact sans le passage par le barrage de Lorcé (tableau 4). Lors du premier déversement du 11-04-16, un lot de N=50 individus a été déversé 200m en aval du barrage de Lorcé (8,2km en amont de Heid de Goreux) et N=20 (40%) ont été détectés à la fin du débit réservé à Heid de Goreux. N=2 individus ont été recapturés à Méry (Ourthe) dont N=1 sans être détecté à Heid de Goreux. Lors du deuxième déversement le 20-04-16, 3 lots ont été déversés dans le débit réservé à différentes distance de Heid de Goreux. Pour le premier lot, N=50 individus ont été déversés juste en aval du barrage de Lorcé et N=16 ont été détectés à Heid de Goreux dont N=2 ont été recapturés par la suite à Méry. Le deuxième lot (N=50) a été déversé aux Fonds de Quareux à 4,6km en amont de Heid de Goreux. Parmi ces individus, N=18 ont été détectés à Heid à Goreux (36%) et N=5 ont été recapturés à Méry dont N=3 sans être détecté à Heid de Goreux. Enfin le troisième lot, déversé à Nonceveux le plus en aval à 2,6km en amont de Heid de Goreux comptait N=62 individus. Au total, N=31 (50%) individus ont été détectés à Heid de Goreux et N=8 ont été recapturés à Méry dont N=3 sans être détecté à Heid de Goreux.

Tableau 4: Données de capture de poissons à Méry (Ourthe) déversés dans le débit réservé en aval du barrage de Lorcé selon la date et le lieu de déversement, la distance par rapport à Heid de Goreux et leur détection éventuelle à Heid de Goreux

Date Déversement	Lieu (débit réservé)	Distance de HdG (km)	N déversés	N détectés HdG	% détectés HdG	N détectés HdG + capturés à Méry	N uniquement capturés à Méry
11-04-16	Aval barrage de Lorcé	8,2	50	20	40%	1	1
20-04-16	Aval barrage de Lorcé	8,2	50	16	32%	2	0
20-04-16	Fonds de Quareux	4,6	50	18	36%	2	3
20-04-16	Nonceveux	2,6	62	31	50%	5	3
Total			212	85	40%	17	(10 - 7)

4.5.3.3. Facteur de correction : efficacité de détection des antennes de Heid de Goreux

Un nombre non négligeable de smolts de saumon ont été recapturés à Méry sans être détectés au moins une fois à une des quatre antennes placées à Heid de Goreux. Cette observation prouve que les antennes de Heid de Goreux ne sont pas efficaces à 100% et que le nombre de poissons détectés est certainement sous-estimé.

Si on reprend le nombre de poissons déversés directement dans le débit réservé en aval du barrage de Lorcé, N=17 individus ont été capturés à Méry dont N=7 (41%) n'ont pas été détectés à la fin du débit réservé. Cela suggère que les antennes du débit réservé sont

efficaces à 59%. L'ajout des données des poissons déversés en amont du barrage de Lorcé, permet de confirmer cette tendance pour l'ensemble des antennes étant donné qu'il n'est pas possible de connaître la voie de passage pour les poissons non détectés à Heid de Goreux et capturés à Méry. Avec un taux de 59% également pour les individus détectés à Heid de Goreux et capturés à Méry, le facteur de correction pour les 4 antennes de Heid de Goreux (2 dans le débit réservé et 2 en aval des turbines) est de 1,69. Les données précédemment présentées sont donc certainement biaisées par la non détection de certains smolts et il est envisageable de les modifier selon ce facteur de correction (tableau 5).

Pour le premier déversement en amont de Lorcé (11/04/16 : test abaissement de vanne), 20% des smolts auraient utilisé la vanne mobile du barrage de Lorcé comme voie de passage contre 31% des smolts par les turbines de Heid de Goreux et 11% par l'exutoire de dévalaison. Pour le second déversement en amont de Lorcé (20/04/16 : test entonnement), 21% des smolts auraient utilisé la micro-turbine de Lorcé comme voie de passage, 21% par les turbines de Heid de Goreux et 32% par l'exutoire de dévalaison.

Pour les 4 lots déversés directement dans le débit réservé, on observe une différence entre les deux lots déversés juste en aval du barrage de Lorcé avec un pourcentage corrigé plus élevé de 68% pour ceux déversés le 11/04/16 contre 54% pour ceux déversés le 20/04/16. On observe également pour les 3 lots déversés le 20/04/16 à des distances différentes de Heid de Goreux que le pourcentage corrigé de passage à Heid de Goreux est logiquement plus important pour le déversement le plus en aval à Nonceveux 85% (2,6km) contre en moyenne 60% pour les deux points de déversement plus en amont.

Tableau 5 : Données de détection et du nombre de poissons selon la voie de passage sans et avec le facteur de correction

Données		Lots déversés					
Date Déversement		11-04-16	20-04-16	11-04-16	20-04-16	20-04-16	20-04-16
Lieu de déversement		Amont Lorcé	Amont Lorcé	Aval Lorcé (DR)	Aval Lorcé (DR)	Fonds de Quareux (DR)	Nonceveux (DR)
N déversés		300	300	50	50	50	62
Voies de passage	Vanne mobile	N	35	-	-	-	-
		%	12%	-	-	-	-
		N corrigé	59	-	-	-	-
		% corrigé	20%	-	-	-	-
	Turbines HdG	N	55	37	-	-	-
		%	18%	12%	-	-	-
		N corrigé	93	63	-	-	-
		% corrigé	31%	21%	-	-	-
	Micro-turbine Lorcé	N	-	38	-	-	-
		%	-	13%	-	-	-
		N corrigé	-	64	-	-	-
		% corrigé	-	21%	-	-	-
	Exutoire de dévalaison	N exutoire Lorcé	34	97	-	-	-
		% exutoire Lorcé	11%	32%	-	-	-
		N détectés à HdG	15	32	20	16	18
		% arrivés à HdG	47%	33%	40%	32%	36%
N détectés à HdG corrigé		25	54	34	27	30	
% arrivés à HdG corrigé		74%	56%	68%	54%	60%	

4.3.6. Temps de parcours et vitesse de migration

La combinaison de systèmes de détection automatiques et de piégeage a permis d'approfondir nos connaissances sur les temps de parcours selon les caractéristiques du tronçon. Ces temps de parcours calculés sont (tableaux 6 et 7) :

- Après leur déversement à Targnon, les smolts de saumon atlantique ont été détectés à Lorcé (3,75km en aval) avec un laps de temps moyen de 26h (moyenne de 30h pour le premier déversement et 24h en moyenne pour le second déversement). Les deux déversements confondus, le temps de détection minimum est de 6h et le temps maximum est de 135h (5,5 jours). Ces temps ne sont pas utilisables pour estimer des vitesses de migration car le moment précis du départ du smolt après son déversement n'est pas connu.

- De Lorcé à Heid de Goreux, les voies de passages sont différentes :
 - Via l'exutoire de dévalaison et le débit réservé (8,2km), le temps de parcours est en moyenne de 121h (166h pour le premier déversement et 77h pour le second déversement) avec une valeur minimum de 35h et maximum de 323h (13j). La vitesse moyenne est donc de 0,02m/s (1,9km/j).
 - Via la vanne mobile et le débit réservé (8,2km : lors du 1^{er} déversement), le temps de parcours moyen est de 52h (min=1h et max=146h). La vitesse de progression est en moyenne de 0,04m/s (3,9km/j) avec une vitesse minimum de 0,016m/s (1,3km/j) et maximum de 2,3m/s (200km/j).
 - Via le passage par la microturbine de Lorcé et le débit réservé (8,2km : lors du second déversement), le temps de parcours est en moyenne de 58h (min=1h et max=140h). La vitesse moyenne est de 0,04m/s (3,4km/j) avec une valeur minimum de 0,02m/s (1,4km/j) et maximum de 2,4m/s (210km/j).
 - Via les turbines de Heid de Goreux (3,5km) le temps de parcours moyen est 8h (min=30min et max=140h) avec une valeur moyenne de 5h pour le premier déversement et de 13h pour le second déversement.
- De Heid de Goreux à Méry le temps de parcours moyen est de 105h (min=29h et max=247h). La vitesse de migration moyenne est de 0,11m/s (9,5km/j) avec une valeur minimum de 0,05m/s (4,3km/j) et maximum de 0,2m/s (17km/j).

Tableau 6 : Temps de parcours (en heure) en fonction des voies de passage et des déversements avec le nombre d'individus dont on a l'information, le temps moyen, médian, minimum et maximum

Parcours	Déversement	Voie de passage	N individus	Temps				
				Moyen	Médian	Min	Max	
Targnon - Lorcé (Déversement - détection exutoire)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Amblève	76	30h13	32h14	6h20	134h10 (5j)	
	Amont Lorcé (entonnement)	Amblève	188	23h39	13h45	8h48	135h15 (5j)	
Targnon - Heid de Goreux (Déversement - détection Heid de Goreux)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Exutoire Lorcé	15	212h13 (8j)	200h34 (8j)	103h47 (4j)	369h12 (15j)	
		Vanne mobile	36	69h25 (2j)	58h53 (2j)	15h21	224h09 (9j)	
		Turbines HdG	55	31h03	33h08	8h31	136h53 (5j)	
	Amont Lorcé (entonnement)	Exutoire Lorcé	32	113h01 (4j)	107h37 (4j)	59h04 (2j)	156h16 (6j)	
		microturbine Lorcé	38	81h03 (3j)	84h47 (3j)	13h20	156h14 (6j)	
		Turbines HdG		35h22	15h51	10h32	134h18 (5j)	
Lorcé - Heid de Goreux (dernière détection exutoire - détection Heid de Goreux)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Exutoire Lorcé	15	166h12 (6j)	154h34 (6j)	58h34 (2j)	323h12 (13j)	
		Vanne mobile	5	51h56 (2j)	46h00	0h59	146h21 (6j)	
		Turbines HdG	11	4h55	2h02	0h57	21h45	
	Amont Lorcé (entonnement)	Exutoire Lorcé	32	77h46 (3j)	82h05 (3j)	35h03	130h51 (5j)	
		microturbine Lorcé	26	58h18 (2j)	53h31 (2j)	0h56	140h16 (5j)	
		Turbines HdG	20	13h20	3h55	0h30	116h59 (4j)	
Débit réservé - Heid de Goreux (Déversement DR - détection Heid de Goreux)	Aval Lorcé 1	Débit réservé	20	71h10 (2j)	60h24 (2j)	16h50	226h08 (9j)	
	Aval Lorcé 2	Débit réservé	16	65h58 (2j)	58h33 (2j)	12h04	154h57 (6j)	
	Fonds de Quareux 2	Débit réservé	18	53h05 (2j)	56h10 (2j)	11h46	106h31 (4j)	
	Nonceveux 2	Débit réservé	31	22h29	10h15	5h18	59h40 (2j)	
Heid de Goreux - Méry (détection Heid de Goreux - capture Méry)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Exutoire Lorcé	1	225h25 (9j)	-	-	-	
		Vanne mobile	2	138h32 (5j)	-	29h08	247h55 (10j)	
		Turbines HdG	1	54h14 (2j)	-	-	-	
	Amont Lorcé (entonnement)	Exutoire Lorcé	0	-	-	-	-	
		microturbine Lorcé	7	71h11 (2j)	69h07 (2j)	51h31 (2j)	99h52 (4j)	
		Turbines HdG	5	100h (4j)	101h (4j)	78h59 (3j)	127h45 (5j)	
	Aval Lorcé 1	Débit réservé	1	175h02 (7j)	-	-	-	
		Aval lorcé 2	Débit réservé	2	103h22 (4j)	-	101h56 (4j)	104h48 (4j)
			Débit réservé	2	90h17 (3j)	-	75h18 (3j)	105h16 (4j)
		Nonceveux 2	Débit réservé	5	110h47 (4j)	107h28 (4j)	102h28 (4j)	129h05 (5j)
Targnon - Méry (Déversement amont Lorcé - capture Méry)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Exutoire Lorcé	1	330h (13j)	-	-	-	
		Vanne mobile	2	201h (8j)	-	66h (2j)	354h (14j)	
		Turbines HdG	1	66h (2j)	-	-	-	
		Inconnue	6	98h (4j)	66h (2j)	66h (2j)	258h	
	Amont Lorcé (entonnement)	Exutoire Lorcé	2	128h (5j)	-	116h (4j)	140h (5j)	
		microturbine Lorcé	6	136h (5j)	128h (5j)	116h (4j)	140h (5j)	
		Turbines HdG	5	121h (5j)	116h (4j)	116h (4j)	140h (5j)	
		Inconnue	6	128h (5j)	116h (4j)	116h (4j)	164h (6j)	
Débit réservé - Méry (Déversement débit réservé - capture Méry)	Aval Lorcé 1	Débit réservé	2	281h (11j)	-	233h (9j)	329h (13j)	
	Aval Lorcé 2	Débit réservé	2	127h (5j)	-	115h (4j)	139h (5j)	
	Fonds de Quareux 2	Débit réservé	5	119h (4j)	114h (4j)	114h (4j)	138h (5j)	
	Nonceveux 2	Débit réservé	8	116h (4j)	113h (4j)	113h (4j)	137h (5j)	

Tableau 7 : Vitesses de progression selon la voie de passage et les déversements en mètre par seconde (m/s) et en km par jour (km/j) avec la distance du tronçon étudié, le nombre d'individus et la vitesse moyenne, minimum et maximum

Parcours	Déversement	Voie de passage	Distance (km)	N	V Moyenne		V min.		V max.	
					m/s	km/j	m/s	km/j	m/s	km/j
Lorcé - Heid de Goreux (dernière détection exutoire - détection Heid de Goreux)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Exutoire Lorcé	8,2	15	0,014	1,2	0,007	0,6	0,039	3,4
		Vanne mobile	8,2	5	0,045	3,9	0,016	1,3	2,316	200,1
	Amont Lorcé (entonnement)	Exutoire Lorcé	8,2	32	0,030	2,6	0,017	1,5	0,065	5,6
		microturbine Lorcé	8,2	26	0,039	3,4	0,016	1,4	2,440	210,9
Débit réservé - Heid de Goreux (Déversement DR - détection Heid de Goreux)	Aval Lorcé 1	Débit réservé	8	20	0,031	2,7	0,010	0,8	0,132	11,4
	Aval Lorcé 2	Débit réservé	8	16	0,034	3,0	0,014	1,2	0,184	15,9
	Fonds de Quareux 2	Débit réservé	4,6	18	0,024	2,1	0,012	1,0	0,109	9,4
	Nonceveux 2	Débit réservé	2,6	31	0,033	2,8	0,012	1,0	0,136	11,8
Heid de Goreux - Méry (détection Heid de Goreux - capture Méry)	Amont Lorcé (vanne mobile)	Exutoire Lorcé	34	1	0,042	3,6	-	-	-	-
		Vanne mobile	34	2	0,068	5,9	0,038	3,3	0,324	28,0
		Turbines HdG	34	1	0,175	15,1	-	-	-	-
	Amont Lorcé (entonnement)	Exutoire Lorcé	34	0	-	-	-	-	-	-
		microturbine Lorcé	34	6	0,133	11,5	0,095	8,2	0,183	15,8
		Turbines HdG	34	5	0,094	8,2	0,074	6,4	0,120	10,3
	Aval Lorcé 1	Débit réservé	34	1	0,054	4,7	-	-	-	-
	Aval Lorcé 2	Débit réservé	34	2	0,092	7,9	0,090	7,8	0,093	8,0
	Fonds de Quareux 2	Débit réservé	34	2	0,105	9,1	0,090	7,8	0,125	10,8
	Nonceveux 2	Débit réservé	34	5	0,086	7,4	0,073	6,3	0,092	8,0
Débit réservé - Méry (Déversement débit réservé - capture Méry)	Aval Lorcé 1	Débit réservé	45,7	2	0,045	3,9	0,039	3,3	0,054	4,7
	Aval Lorcé 2	Débit réservé	45,7	2	0,100	8,6	0,091	7,9	0,110	9,5
	Fonds de Quareux 2	Débit réservé	38,6	5	0,090	7,8	0,078	6,7	0,094	8,1
	Nonceveux 2	Débit réservé	36,6	8	0,088	7,6	0,074	6,4	0,090	7,8

4.3.7. Incidences de différents facteurs sur les voies de passage et les temps de parcours

4.3.7.1. Puissance de turbinage de Heid de Goreux

La puissance de turbinage à Heid de Goreux pourrait influencer le choix d'utiliser le canal d'amenée comme voie de passage. Une analyse de la relation entre la puissance de turbinage totale des deux turbines de Heid de Goreux (moyenne à l'heure) et le nombre de passage par heure a été effectuée. On observe que le nombre d'individu empruntant les turbines varie selon le temps de la même manière que la puissance de turbinage varie au cours du temps (figure 50). Une régression linéaire généralisée démontre cependant que le nombre d'individu empruntant les turbines de Heid de Goreux comme voie de passage n'est pas significativement lié à la puissance de turbinage (GLM, $p=0,32$).

Figure 50 : Relation entre le nombre d'individus empruntant les turbines de Heid de Goreux comme voie de passage et la puissance de turbinage totale à Heid de Goreux

4.3.7.2. Influence de la taille sur le choix de la voie de passage

Lors du premier déversement, le choix de la voie de passage se limitait à trois possibilités : l'exutoire de dévalaison, la vanne mobile (abaissement continu) et les turbines de Heid de Goreux. L'analyse de la taille des individus selon la voie de passage n'a montré aucune différence significative (test de Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 0,52$, $df=2$, $p=0,77$) : la valeur médiane pour ceux qui ont emprunté l'exutoire est de 133mm, de 132mm pour ceux qui ont emprunté la vanne mobile et de 133mm pour ceux qui ont emprunté les turbines de Heid de Goreux (figure 51).

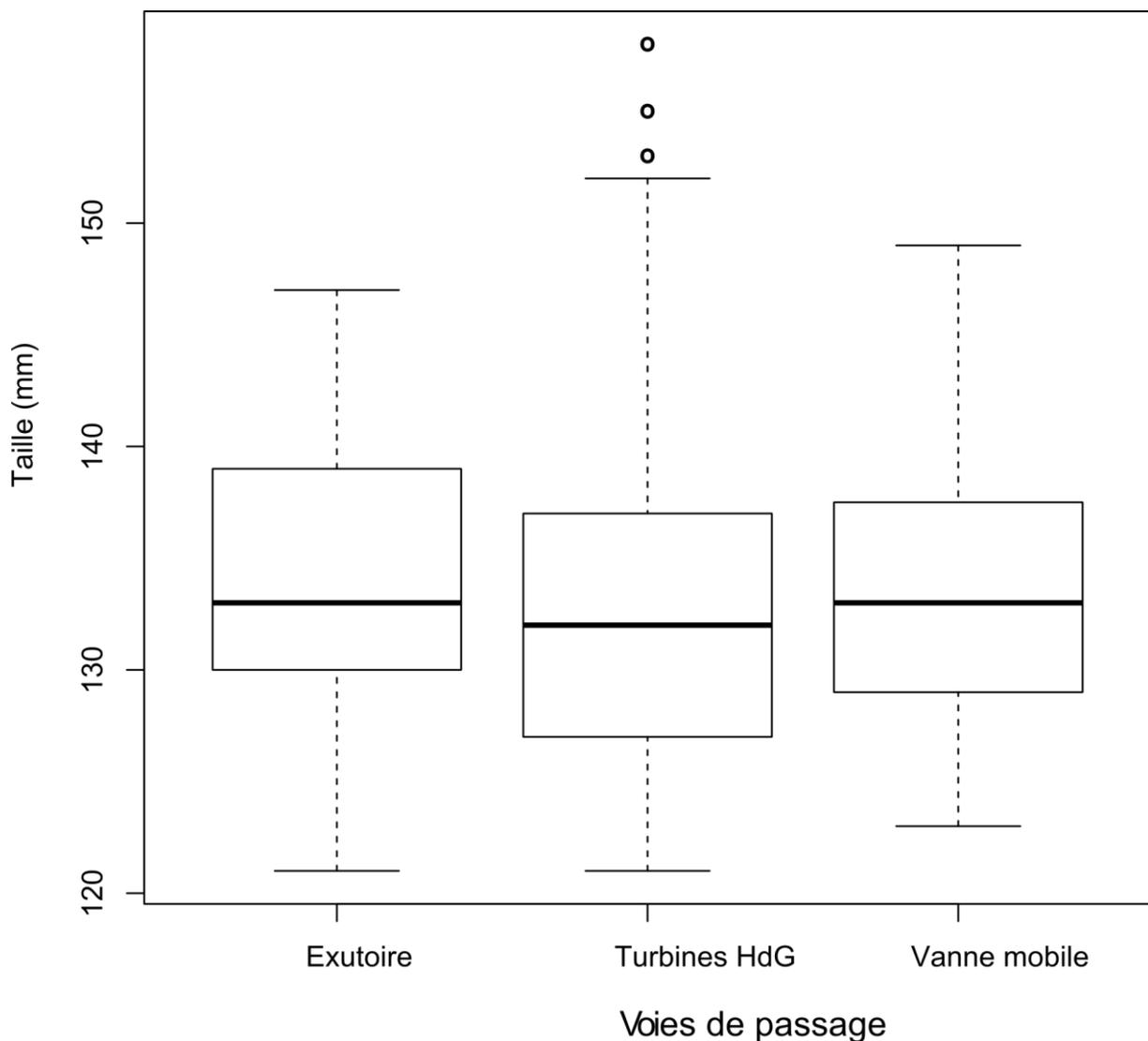


Figure 51 : Distribution des tailles selon la voie de passage lors du premier déversement amont de Lorcé

Lors du second déversement, le choix de la voie de passage se limitait à trois possibilités aussi : l'exutoire de dévalaison, la microturbine de Lorcé et les turbines de Heid de Goreux. L'analyse de la taille des individus selon la voie de passage n'a montré aucune différence significative (test de Kruskal-Wallis, $\chi^2 = 1,73$, $df=2$, $p=0,42$) : la valeur médiane pour ceux qui ont emprunté l'exutoire est de 133mm, 135mm pour ceux qui ont emprunté la microturbine de Lorcé et 135mm pour ceux qui ont emprunté les turbines de Heid de Goreux (figure 52).

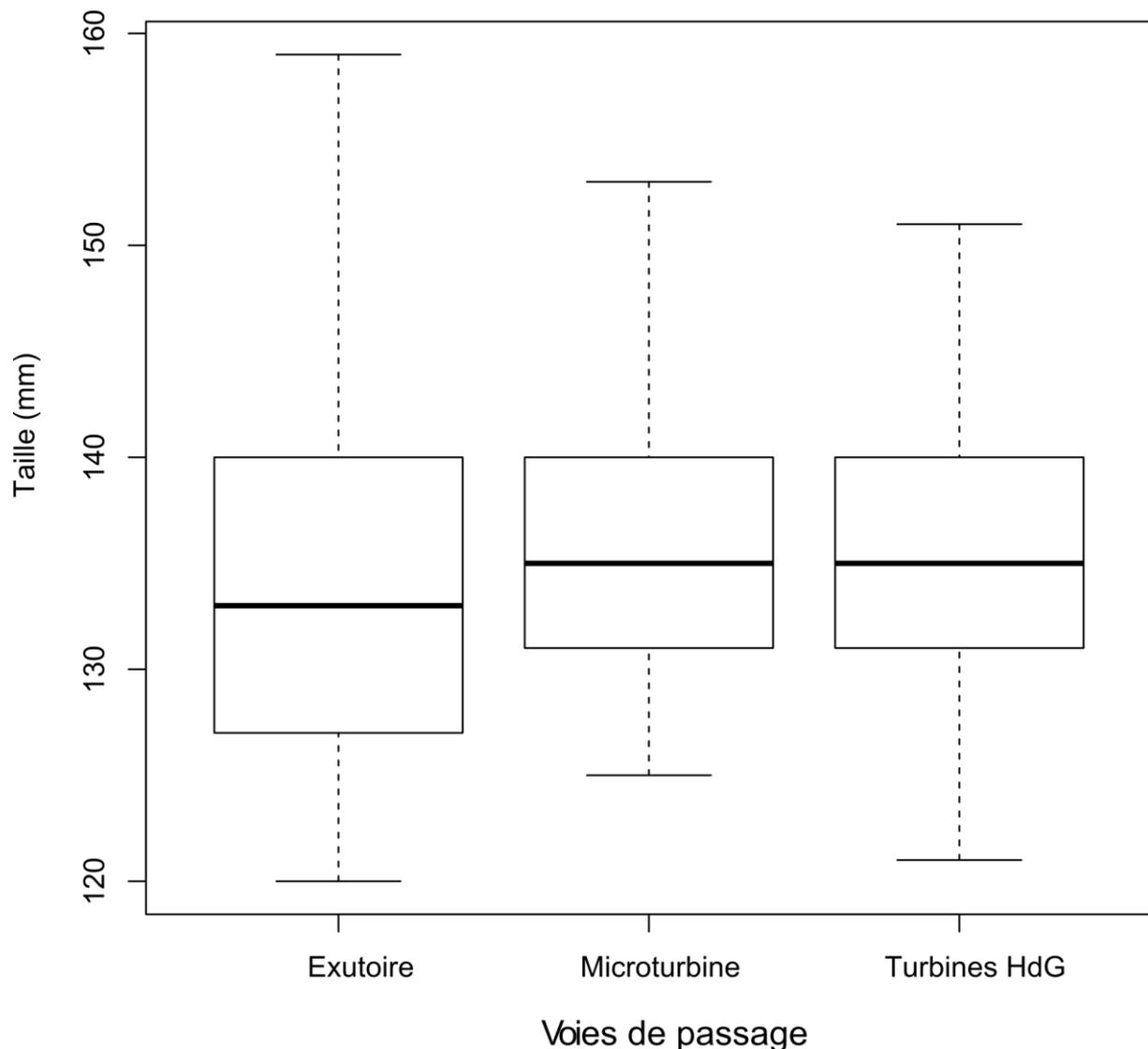


Figure 52 : Distribution des tailles selon la voie de passage du second déversement amont de Lorcé

4.3.7.3. Relation entre la taille des smolts et le temps de parcours dans le débit réservé

Pour $n=114$ smolts, l'information du temps de parcours entre Lorcé et Heid de Goreux via le débit réservé est disponible. L'analyse de la relation entre la taille des poissons et leur temps de parcours (figure 53) démontre une corrélation négative significative (Rang de Spearman,

$p < 0,001$). En d'autres mots, plus la taille des individus est grande plus le temps de parcours dans le débit réservé (8,2km) est court.

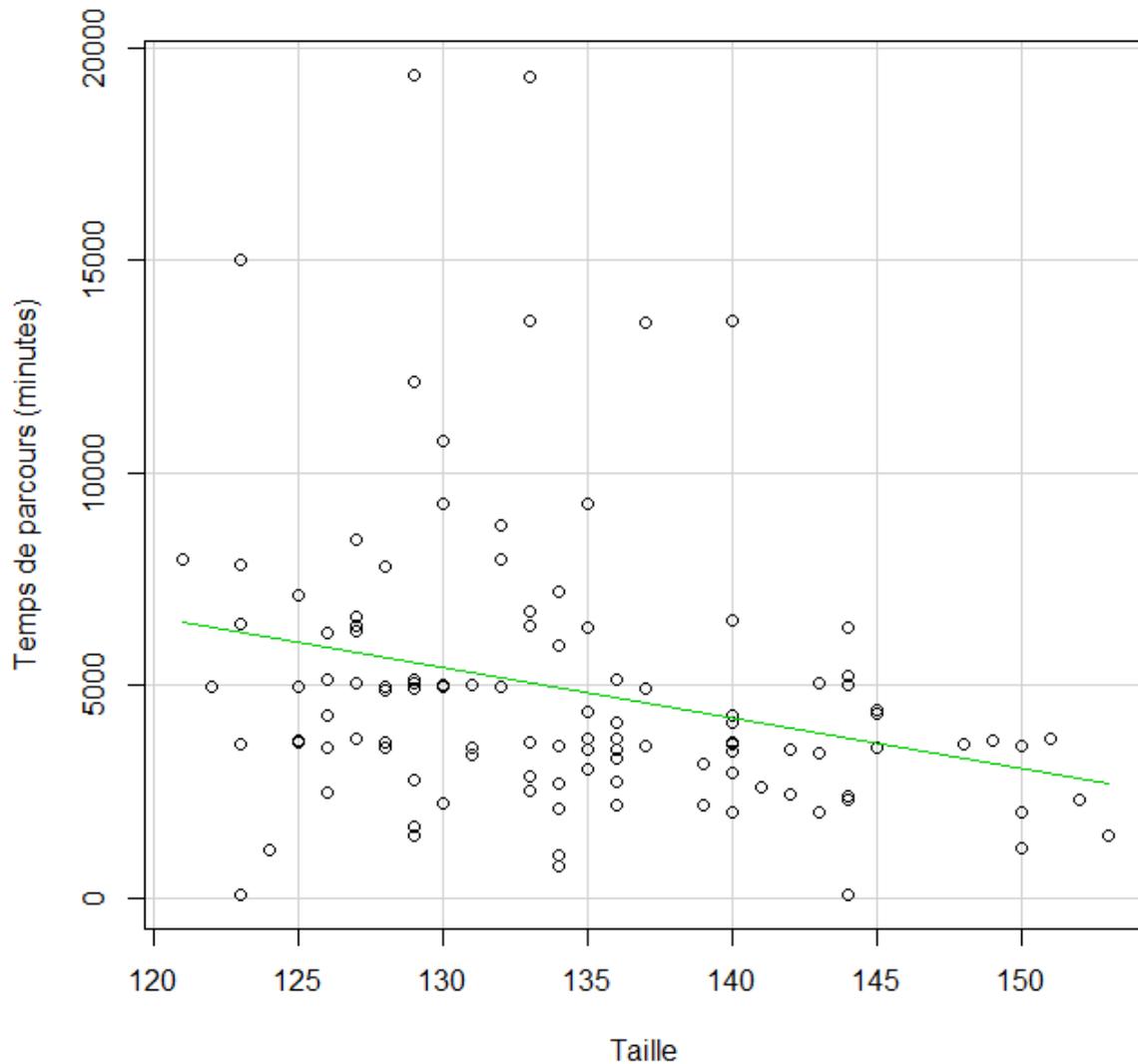


Figure 53 : Relation entre la taille (mm) des individus qui ont emprunté le débit réservé et le temps de parcours en minutes.

4.3.7.4. Relation entre le niveau du débit réservé et le temps de parcours dans le débit réservé

Le débit réservé situé en aval du barrage de Lorcé (8,2km) est dépendant du barrage pour son alimentation en eau et est actuellement fixé à $3\text{m}^3/\text{s}$. Il est alimenté par la microturbine de Lorcé. En l'absence de mesure de débit au sein du tronçon court-circuité (en cours de calibration, SPW), des mesures de hauteur d'eau étaient seulement disponibles. Il n'existe pas de relation significative (Régression généralisée, $p=0,78$) entre les hauteurs d'eau du débit réservé et du temps de parcours des smolts (figure 54). Cependant il est important de noter

que la gamme de hauteur d'eau recensée durant les suivis comportementaux de 2016 est faible avec des variations moyennes de hauteur d'à peine de 2cm.

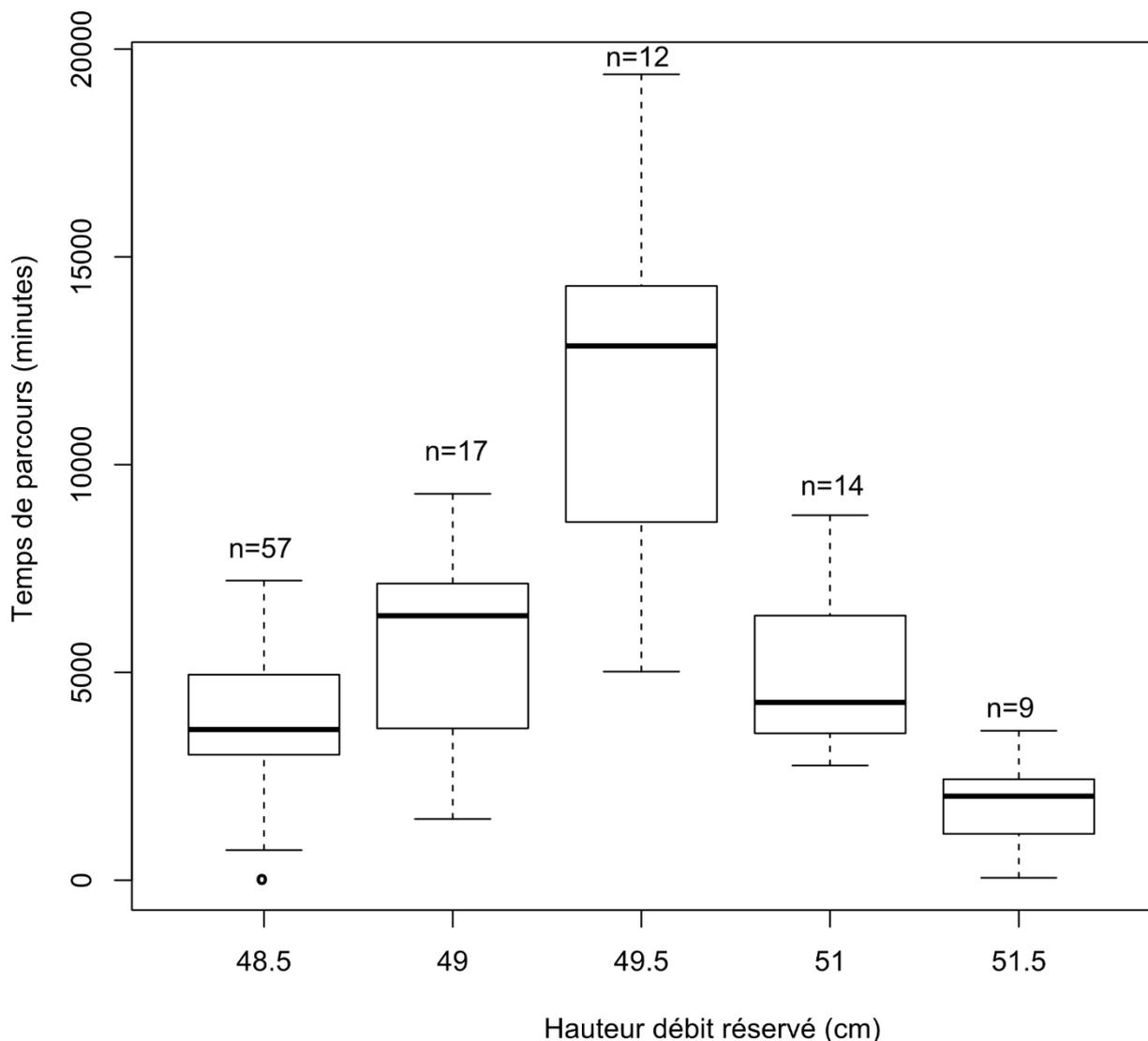


Figure 54 : Boite de dispersion des temps de parcours (en minute) dans le débit réservé selon 5 classes de hauteurs d'eau recensées durant les suivis comportementaux

4.4. Discussion

Cette étude réalisée au niveau du complexe hydroélectrique de Lorcé-Heid de Goreux s'insère dans la continuité de nombreux projets de recherche gérés par le Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie de l'Université de Liège depuis 2009. L'objectif global est l'étude de la franchissabilité du barrage de Lorcé via des suivis comportementaux printaniers de smolts de saumon atlantiques lors de leur dévalaison vers la mer. Dans un premier temps, lors du printemps 2009 une étude comportementale préliminaire par radio-pistage a permis de démontrer l'emplacement potentiel d'un exutoire de dévalaison sur le site du barrage de

Lorcé (Ovidio et al., 2009). A l'époque, la vanne secteur du barrage de Lorcé avait été désignée comme emplacement idéal pour y placer un exutoire de dévalaison, mais cette solution n'a pas été possible pour des raisons de sécurité de fermeture de la vanne en cas de crue. Profitant d'un passage ancien dans la structure en béton existante, l'exploitant a entrepris en 2011 et terminé au printemps 2012 l'aménagement d'un exutoire de dévalaison en rive gauche proche du plan de grille de la prise d'eau des turbines du complexe hydroélectrique. Lors des printemps 2012 et 2013, des suivis comportementaux par technologies RFID (antenne à l'entrée de l'exutoire uniquement) ont permis de déterminer un taux d'attraction de l'exutoire sans pouvoir garantir son efficacité car il n'était pas possible de déterminer si un poisson détecté à l'entrée de l'exutoire l'avait utilisé (Benitez et al., 2013). Au printemps 2014, un piège de capture à la sortie de l'exutoire de dévalaison a été installé et l'efficacité du dispositif a pu être établie. Cependant l'existence d'autres voies de passage ont été observées suite à la capture d'individus marqués dans un second piège de dévalaison en aval sur l'Ourthe (Méry) sans être capturés dans le piège de Lorcé (passage exutoire de dévalaison). En 2015, un complexe d'antennes RFID a permis de confirmer l'existence d'autres voies de passage que l'exutoire de dévalaison du barrage de Lorcé. De plus, l'efficacité de l'exutoire de dévalaison s'est à nouveau avérée faible et les voies de passages privilégiées étaient les turbines : turbines principales de Heid de Goreux via le canal d'aménée et la microturbine de Lorcé (Benitez et al., 2015). A la suite de cette analyse globale des voies de passage sur le site du barrage de Lorcé, une liste non exhaustive des améliorations possibles à apporter a été suggérée. De plus, le débit réservé ($3\text{m}^3/\text{s}$) en aval de Lorcé (8,2km) s'est montré néfaste sur la migration des smolts car il allonge fortement le temps de migration entre Lorcé et Heid de Goreux. Avec le réseau d'antennes de détection RFID utilisé en 2015, mis à part l'ajout d'une antenne de détection à l'entrée amont de l'échelle à poissons du barrage (déterminer si des tentatives de dévalaison par l'échelle sont récurrentes), le but de cette année de suivi était d'étudier séparément l'impact sur la dévalaison des smolts dans ce tronçon de l'Amblève de deux améliorations proposées : l'abaissement partiel en continu d'une vanne mobile du barrage et l'installation d'un entonnement à l'entrée de l'exutoire. En effet, testés séparément, ces configurations devaient permettre à un plus grand pourcentage d'individus de franchir complètement le complexe hydroélectrique de Lorcé – Heid de Goreux soit par la vanne mobile (abaissement partiel de la vanne) ou soit par l'exutoire de dévalaison (ajout d'un entonnement). Enfin, une attention plus particulière a été portée sur l'impact réel du débit réservé pour ainsi améliorer le rétablissement de la libre circulation des poissons sur ce tronçon de l'Amblève.

4.4.1. Etude de l'attraction et de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison de Lorcé

Avant de décider d'utiliser l'exutoire de dévalaison de Lorcé, les poissons doivent trouver l'entrée du dispositif. Depuis le printemps 2012, l'**attraction** de l'exutoire de dévalaison est connue grâce au pourcentage d'individus détectés à l'entrée de l'exutoire par rapport au nombre total d'individus marqués et déversés en amont du barrage (tableau 8). Il a été démontré que ce taux d'attraction est indépendant de la distance entre Lorcé et le lieu de déversement (Benitez et al., 2013 et 2015 ; Ovidio et al., 2016). Avant 2015, ce taux d'attraction varie de 26% à 42% et l'installation d'une lampe au mercure s'est avérée bénéfique avec un impact moins important que sur d'autres sites (Ovidio et al., 2016 ; 17 à 55%: Chanseau et al., 1999; 5-28 à 70%: Gosset and Travade, 1999; 11 à 64%: Fjeldstad et al., 2012). En 2015, le taux d'attraction était plus faible que les années précédentes avec 18% alors que le dispositif de franchissement possédait une configuration identique aux années 2013 et 2014. La date de déversement était plus tardive que les autres années. Or, en 2015, le pic de dévalaison des smolts de saumon « sauvages » s'est déroulé très tôt en raison d'un coup d'eau fin mars début avril 2015 et un seuil thermique $>8^{\circ}\text{C}$. Il est alors probable que la fenêtre comportementale de migration touchait à sa fin lors de notre déversement, ce qui a pu avoir une influence sur le taux de détection. D'autres variables ont pu jouer un rôle sur ce faible taux d'attraction comme le marquage tardif des smolts (mi-avril au lieu de début mars) et le mauvais état sanitaire de certains saumons causé par le cumul du marquage tardif et d'un début de période de dévalaison précoce. Il est possible aussi que l'utilisation de smolts de truite de mer élevés en captivité (première année d'utilisation) avec un degré de desmoltification avancé (=perte des caractères physiologiques propres au smolt) ait été un facteur prépondérant comme le confirme la capture d'une truite désmoltifiée dans l'exutoire de Lorcé au printemps 2016 marquée et déversée au printemps 2015.

Le premier déversement de 2016 avec l'abaissement partiel en continu d'une des deux vannes mobiles du barrage de Lorcé montre un taux d'attraction (25%) meilleur qu'en 2015 mais toujours inférieur aux trois premières années de suivi (tableau 8). Il paraît logique que ce taux d'attraction soit plus faible étant donné l'abaissement d'une vanne et la création d'une autre voie de passage. Lors du second déversement, la vanne mobile était relevée et l'entonnement était installé à l'entrée de l'exutoire. Le taux d'attraction au niveau de l'entrée de l'exutoire était de 45% et de 63% à l'entrée de l'entonnement. Globalement, l'entrée de l'entonnement se montre plus attractive que l'entrée de l'exutoire sans entonnement. Si on ne prend en compte que l'entrée de l'exutoire, les résultats obtenus lors de ce deuxième déversement sont de même de grandeur que ceux obtenus en 2013 et 2014. Uniquement d'un point de vue taux d'attraction, l'abaissement de la vanne mobile diminue le taux d'attraction de l'entrée de l'exutoire alors que l'entonnement l'augmente à son entrée.

Comme pour les années précédentes, de nombreux individus ont souvent été détectés plusieurs fois devant l'entrée de l'exutoire et/ou l'entrée de l'entonnement pour le second déversement 2016, représentant un certain temps de recherche. Bien qu'une grande proportion (>60%) des individus détectés passent moins de 30 minutes devant l'entrée de l'exutoire et/ou l'entrée de l'entonnement, d'autres individus peuvent rester à proximité de l'exutoire de 1 à plusieurs jours. Plus particulièrement, ce temps de recherche lors du second déversement en 2016 est d'un point de vue proportion, plus faible uniquement pour l'entrée de l'exutoire avec <1min pour plus de 60% des individus. La structure propre de l'exutoire peut être perçue comme un danger par les poissons. Le tunnel étroit et la pente importante du dispositif facilitant le passage du barrage entraînent une forte augmentation du courant ainsi que de la pression (Kemp et al., 2006). Ces paramètres peuvent donc affecter le comportement des poissons. En effet, une accélération de la vitesse peut être répulsive pour un smolt (Vowles et al., 2014). De plus, les smolts à l'approche de variations trop importantes de vitesse se placent en rhéotaxie négative (tête vers l'amont) afin de pouvoir résister au courant comme observé à Lorcé (Benitez et al., 2013). Les mesures réalisées à l'entrée de l'exutoire en août 2015 indiquent le passage d'une vitesse de courant de 0,15m/s à 0,50m/s et à 1,1m/s respectivement à 0,5m, 0,25m et 0m en amont de l'entrée de l'exutoire. Ces vitesses sont bien inférieures aux capacités de nage des smolts de 150mm (de 2,5 à 3,5 m/s en « sprint » ; Baudoin et al., 2014) leur permettant de s'échapper de l'entrée de l'exutoire. Cependant, une attente de 24h reste élevée et il est connu qu'une hésitation trop importante devant un exutoire peut entraîner une dépense énergétique élevée et mener à un épuisement (Scruton et al., 2007). Quant aux vitesses mesurées au sein de l'entonnement, elles sont croissantes de 0,35m/s à 1,4m/s à des distances de l'entrée de l'exutoire respectivement de 1,3m, 0,65m et 0m. Ce gradient de vitesse est moins important que sans entonnement et se montre certainement moins répulsif vu le plus grand nombre de poissons détectés avec entonnement. De plus le temps de présence devant l'entrée de l'exutoire avec entonnement est plus faible car certains poissons, en rhéotaxie négative, se faisaient comme « aspirer » à l'approche de l'entrée de l'exutoire (fin de l'entonnement) comme le confirme des vidéos enregistrées ce printemps 2016. D'autres poissons ont également emprunté le système d'entonnement et d'exutoire directement en rhéotaxie positive, fait jamais observé dans toutes les autres conditions expérimentales. Bien qu'une partie des smolts présents au niveau de l'entonnement ait été capable de résister au courant comme observé sans entonnement, ce prototype d'entonnement a démontré qu'il pouvait améliorer les conditions hydrauliques à l'entrée de l'exutoire. Le temps de recherche devant le dispositif de franchissement avec entonnement en 2016 et sans entonnement en 2014 et 2015 ne varie pas significativement entre les individus capturés ou non dans le piège. En revanche ce temps de recherche lors du test de l'abaissement d'une vanne mobile est plus important pour les individus qui utilisent

l'exutoire de dévalaison comme voie de passage. Il semblerait donc que le temps de recherche n'influence pas le choix d'utiliser ou non l'exutoire mis à part lorsqu'une vanne mobile est abaissée.

Après avoir repéré l'entrée de l'exutoire de dévalaison, le poisson doit décider de l'utiliser. Un **pourcentage d'efficacité** peut être calculé ensuite selon le nombre de poissons qui ont emprunté l'exutoire par rapport au nombre total de poissons déversés ($N_{\text{capturés}}/N_{\text{déversés}}$). L'absence d'information entre le déversement et l'arrivée du poisson devant l'entrée de l'exutoire nous a amené à calculer un **pourcentage d'efficacité corrigé** (Benitez et al., 2015 ; Ovidio et al., 2016) qui est le nombre de poissons empruntant l'exutoire de dévalaison par rapport au nombre de poissons qui se sont réellement présentés devant l'entrée de l'exutoire ($N_{\text{capturés}}/N_{\text{détectés à l'entrée de l'exutoire}}$). Cette donnée est disponible depuis le printemps 2014 avec l'installation du piège de capture en aval de l'exutoire de dévalaison qui confirme que tous les individus détectés, qui se présentent donc à l'entrée de l'exutoire, n'empruntent pas le dispositif. Pour rappel, en moyenne en 2014, 38% (efficacité corrigée) des smolts de saumon détectés sont capturés dans le piège de dévalaison (soit 16% des smolts déversés : efficacité totale) contre 40% (efficacité corrigée) et 7% (efficacité totale) pour 2015 (tableau 8). Larinier et Travade (1999) ont mis en évidence l'importance des conditions hydrodynamiques autour de l'exutoire. Bien qu'en partie dû aux conditions particulières de l'étude, ces pourcentage reste très faible par rapport à l'efficacité d'autres exutoires à travers le monde qui en plus présentent des efficacités réelles (capturé vs. déversés) : 73% en France (Croze et al., 1999) au niveau d'un exutoire avec un débit entrant de $3\text{m}^3/\text{s}$ installé sur un barrage de la Garonne (module= $52\text{m}^3/\text{s}$) et 71% au Canada (Scruton et al., 2007) au niveau d'un exutoire avec un débit entrant de $1\text{m}^3/\text{s}$ sur un barrage de l'Exploits (module $290\text{m}^3/\text{s}$). Face à un exutoire, le comportement du smolt se compose de 3 phases: l'approche du barrage, la découverte de la veine de courant menant à l'entrée de l'exutoire et la décision d'emprunter cet exutoire ou non (Johnson & Dauble, 2006). L'ajout d'un entonnement à l'entrée de l'exutoire de Lorcé comme réalisé avec succès sur le barrage de Poutès sur l'Allier (Larinier et Boyer-Bernard, 1991) permet une mise en vitesse progressive de l'écoulement en réduisant les phénomènes de décollement et les turbulences grâce à son profil elliptique. Dans notre étude, les pourcentages d'efficacité totale et corrigée sont en nette hausse (doublé) avec l'entonnement et sont respectivement de 32% et 72%. Les taux obtenus restent cependant faibles par rapport à d'autres sites d'études dans le monde, mais la configuration du barrage de Lorcé ne permet pas de placer un exutoire de manière aussi optimale que sur d'autres sites plus récents et qui ont fait l'objet d'une réflexion plus globale et intégrée pour la libre circulation des poissons.

Tableau 8 : Récapitulatif des données de suivis comportementaux des smolts saumon (*Salmo salar*) et des smolts truite (*Salmo trutta*) au niveau de l'exutoire de dévalaison de Lorcé avec la configuration de l'exutoire de dévalaison (présence de la lampe à mercure, de la drome, abaissement d'une vanne mobile ou présence de l'entonnement). Les données entre parenthèses correspondent aux données de l'entrée de l'entonnement

Années	Espèces	Configuration exutoire	N déversés	N détectés	% attr.	N capturés	% eff.	% eff. corrigée
2012	<i>S. salar</i>	Rien	450	118	26%	-	-	-
2013	<i>S. salar</i>	Lampe + drome	450	171	38%	-	-	-
2014	<i>S. salar</i>	Lampe + drome	300	126	42%	49	16%	38%
2015	<i>S. salar</i>	Lampe + drome	300	124	18%	49	7%	40%
	<i>S. trutta</i>		400					
2016	<i>S. salar</i>	Lampe + ab. vanne	300	76	25%	34	12%	45%
	<i>S. salar</i>	Lampe + entonnement	300	134 (188)	45% (63%)	97	32%	72% (52%)

4.4.2. Quantification des voies de passage en 2016

Les conditions expérimentales ont été moins compliquées que lors du suivi de 2015 et ont permis d'affiner les résultats précédemment obtenus. Cependant, certaines détections ont été manquées durant toute la durée de l'étude, ce qui a été confirmé par la capture à Méry d'individus non détectés à Heid de Goreux. Avec une efficacité de détection de 58% des antennes de Heid de Goreux, un facteur de correction de 1,72 a été établi selon cette efficacité de détection et adapté aux résultats obtenus afin de s'approcher au mieux de la réalité. Cette efficacité non totale des antennes de Heid de Goreux est certainement liée à la taille des antennes (+ de 5m) difficiles à mettre en place et peut être aussi aux valeurs de débit importantes ce printemps 2016 qui engendrent des vitesses de passage des poissons plus importantes, entraînés par le courant. Pour les individus non détectés et/ou non capturés à Lorcé, Heid de Goreux et Méry, une hypothèse qui peut expliquer l'absence d'information est la capture par des prédateurs avant d'atteindre le barrage de Lorcé ou Heid de Goreux ainsi qu'une possible desmoltification entraînant l'arrêt de leur migration.

Le réseau de détection RFID installé à Heid de Goreux et Lorcé lors de la campagne 2015 a permis la détection de 78 individus et de quantifier les voies de passage lorsque la configuration du barrage est : fonctionnement des turbines de Heid de Goreux et de la microturbine de Lorcé, exutoire de dévalaison ouvert et vannes mobiles relevées. Nous avons observé que les smolts de saumon empruntaient préférentiellement l'exutoire (63%), puis la microturbine (26%), et enfin le tunnel d'amenée aux turbines de Heid de Goreux (11%). Les

smolts truites de mer empruntaient principalement les turbines de Heid de Goreux (48%), puis l'exutoire (27%) et la microturbine (25%). Néanmoins, de nombreux réglages ont été nécessaires afin d'optimiser l'efficacité du système de détection et comme ces problèmes n'ont été réglés que 7 jours après le déversement des smolts de saumon, il est probable que l'utilisation des voies de passage (turbines Heid de Goreux et microturbine de Lorcé) ait été sous-estimée et biaisée pour les smolts de saumon.

Les suivis 2016 ont démontré que lors de l'abaissement partiel de la vanne mobile, les voies de passage possibles étaient la vanne mobile, l'exutoire de dévalaison et les turbines de Heid de Goreux (microturbine de Lorcé non fonctionnelle). Sur 124 individus dont on connaît la voie de passage, on observe une utilisation plus importante pour les turbines de Heid de Goreux (44%) puis de la vanne mobile (28%) et ensuite de l'exutoire de dévalaison (27%). En incluant le facteur de correction calculé selon l'efficacité de détection des antennes RFID de Heid de Goreux, le pourcentage d'utilisation des voies de passage passerait à 50% pour les turbines de Heid de Goreux, 32% pour la vanne mobile et 18% pour l'exutoire de dévalaison. **Ainsi, même avec la vanne mobile abaissée partiellement, il apparaît que les turbines de Heid de Goreux restent la voie de passage principale**, comme observé avec les smolts truites en 2015 sans abaissement de vanne.

Lors du second déversement au printemps 2016, les voies de passage possibles étaient : les turbines de Heid de Goreux, la microturbine de Lorcé et l'exutoire de dévalaison (avec l'entonnement). Sur les 172 individus dont on connaît la voie de passage, la majorité (56%) ont emprunté l'exutoire de dévalaison contre 23% par la microturbine de Lorcé et 21% par les turbines de Heid de Goreux. Lorsque l'on inclut le facteur de correction, les pourcentages de voie de passage sont de 43% pour l'exutoire de dévalaison, 29% pour la microturbine de Lorcé et 28% pour les turbines de Heid de Goreux. **L'installation de l'entonnement a permis de minimiser l'utilisation des turbines comme voie de passage** en prenant en compte ou non le facteur de correction, avec un pourcentage d'utilisation de l'exutoire plus important.

4.4.3. Temps de parcours et vitesse de progression

Afin de mener à bien sa dévalaison, il est essentiel que le smolt puisse franchir les barrages, non seulement sans risquer des blessures, mais également en minimisant des retards causés par la recherche d'une voie de passage suite à un temps d'hésitation. En effet, l'attente au niveau du barrage et les temps de parcours prolongés par les différentes entraves à la migration peuvent entraîner une désmoltification (McCormick et al., 1998; Handeland et al., 2004). Le smolt qui migre vers la mer est donc à la fois en dehors de sa fenêtre physiologique (nécessite un temps d'acclimatation plus important dans les estuaires, ce qui augmente la prédation) et en dehors de la fenêtre écologique ce qui multiplie les risques de mortalité

(McCormick et al., 1998). Dans certains cas, la mortalité engendrée par les retards peut être égale à celle engendrée par le passage par les turbines (Marschall et al., 2011). Il est donc important d'étudier l'impact de l'utilisation des différentes voies de passage à Lorcé sur le temps de parcours des smolts et sur leur taux de survie potentiel.

Nous avons constaté que la voie de passage empruntée a influencé le temps de parcours (et la vitesse de migration) chez les saumons. Plusieurs tendances ont été observées :

- Lors de l'utilisation de la **vanne mobile** (premier déversement) comme voie de passage, les temps de parcours entre Lorcé et Heid de Goreux (débit réservé de 8,2km) sont en moyenne de 50h. Ce temps de parcours moyen est similaire à celui de l'utilisation de la **microturbine de Lorcé** lors du second déversement. La vitesse de progression est donc en moyenne de 3,5km/j. Après l'utilisation de l'**exutoire de dévalaison**, dans le débit réservé, les smolts de saumon se déplacent à une vitesse moyenne de 1,2km/j à 2,6km/j (valeur maximum 5,6km/j). Comme observé en 2015 (Benitez et al., 2015) la vitesse de migration moyenne dans le débit réservé est plus rapide lorsque les smolts empruntent la microturbine ou la vanne mobile par rapport à l'exutoire. Le temps d'attente dans le piège et la manipulation lors du contrôle pourrait induire plus de stress chez les smolts et entraîner la nécessité d'une période de récupération avant de reprendre la dévalaison. Cependant cet effet de manipulation est à négliger après le retrait du piège. Globalement, la vitesse moyenne au sein du débit réservé est faible même si quelques individus isolés sont capables de migrer à des vitesses supérieures à l'ensemble des poissons suivis. Les poissons témoins déversés directement dans le débit réservé confirment que les temps de parcours et les vitesses de progression sont faibles dans ce tronçon de l'Amblève. Il faut bien entendu prendre en compte que les poissons déversés directement dans le débit réservé ne démarrent certainement pas leur migration vers l'aval directement et cela engendre un temps de latence. Les données obtenues avec ces lots peuvent donc être surestimées (temps d'adaptation suite au déversement inclus).
- L'utilisation des **turbines de Heid de Goreux** montre logiquement un temps de parcours moyen inférieur au passage par le débit réservé, avec des valeurs moyennes de 5h et 13h pour les deux déversements. Les données de temps de parcours lors de l'utilisation des turbines de Heid de Goreux montrent une variabilité importante (de 30min à 117h) assez surprenante. En effet, les poissons empruntant les turbines de Heid de Goreux devraient avoir un temps de parcours homogène via le passage forcé dans le tunnel d'aménée. Les raisons qui peuvent expliquer ces temps variables sont certainement le temps de recherche d'une voie de passage comme démontré par la

détection d'un individu au niveau de l'entrée de l'exutoire de dévalaison puis de l'entrée de l'échelle à poissons avant d'utiliser les turbines comme voie de passage. Une autre possibilité est le comportement de recherche des poissons au niveau de la colonne d'équilibre entre le canal d'amenée et les turbines de Heid de Goreux. Les poissons sont certainement désorientés et doivent trouver la sortie vers les turbines ce qui pourrait engendrer un retard.

- Les temps de parcours entre Heid de Goreux et Méry observés sont en moyenne de 132h (min. 29h et max. 247h) pour une distance de 34km. Les vitesses de progression sont en moyenne de 6km/j à 12km/j sans influence de la voie de passage utilisées mis à part pour ceux qui ont emprunté l'exutoire de dévalaison.

Avec des temps de parcours plus courts via les turbines de Heid de Goreux, la mortalité engendrée par le passage à travers les turbines ne peut être connue avec précision mais a été estimée par le LDPH pour les smolts de saumon (Benitez et al., 2013) grâce à une formule théorique de Larinier et Travade (1999). En effet, la présence de complexes hydroélectriques peut amener à une mortalité importante (Norrgård et al., 2013; Brevé et al., 2014), pouvant aller jusqu'à 94% sur certains barrages pour les smolts de saumon atlantique (Gustafsson 2010). A Lorcé, la mortalité théorique est de 31% pour les deux turbines Francis de Heid de Goreux et de 23,3% pour la microturbine Francis. Les dommages peuvent être dus aux chocs du poisson avec les différentes parties des turbines, aux accélérations et décélérations brutales de courant et aux variations importantes et rapides de pression et de cavitation (Larinier & Travade 1999). Il existe également une certaine mortalité indirectement liée au passage par les turbines car si la mortalité n'est pas directe, le passage peut désorienter ou étourdir le poisson, et le rendre plus sensible à la prédation dans le canal de fuite (Koed et al., 2002). L'utilisation de la microturbine de Lorcé comme voie de passage réunit les risques de mortalité du passage par une turbine et par le débit réservé. En plus des temps de parcours prolongés qui engendrent des retards, l'utilisation du débit réservé peut entraîner un risque de prédation accru pour les smolts en dévalaison, car la mortalité par prédation augmente avec l'augmentation du temps de parcours (McCormick et al., 1998) et avec la diminution du débit (Aarestrup et al., 2002). Au vu de la topographie de cette partie de l'Amblève, un débit aussi faible engendre une hauteur d'eau et une vitesse de courant faible, ce qui peut entraîner une dépense énergétique importante lors de leurs déplacements. Or, le débit réservé de 3m³/s avait déjà été considéré comme largement insuffisant pour conserver l'intégrité biologique du tronçon pour les espèces qui y sont sédentaires (Ovidio et al., 2007). Une augmentation de débit entre Lorcé et Heid de Goreux serait donc favorable aux poissons qui y ont leur habitat de refuge et d'alimentation et aux smolts qui doivent parcourir l'Amblève pour mener à bien leur migration de dévalaison.

4.4.4. Influence des différents facteurs sur l'utilisation des voies de passage et temps de parcours

- *Influence de la taille*

Face à l'exutoire, la taille des individus n'influence ni le taux de détection (=attraction) ni le taux de capture (=efficacité), tant pour les saumons (2014, 2015 et 2016) que pour les truites (2015), comme précédemment observé à Lorcé (Benitez *et al.*, 2013, Benitez *et al.*, 2015; Ovidio *et al.*, 2016) ou en Norvège pour les smolts de truite de mer (Arnekleiv *et al.*, 2007). Bien que les individus plus grands possèdent une meilleure capacité de nage et qu'ils pourraient mieux résister à l'augmentation de courant (Harvey 1987, Baudoin *et al.*, 2014), il semble que ce paramètre n'ait pas influencé l'utilisation de l'exutoire durant cette étude avec ou sans la présence de l'entonnement. De plus, la taille n'a également pas joué de rôle dans le choix de la voie de passage contrairement à 2015 où la taille moyenne des smolts de truite qui empruntaient la microturbine était statistiquement plus grande que celle des smolts de truite qui empruntaient le tunnel d'amenée (turbines de Heid de Goreux).

- *Influence de la puissance de turbinage à Heid de Goreux*

Lors de l'étude de la relation entre l'utilisation des turbines comme voie de passage et de la puissance turbinée, aucune relation n'a pu être mise en évidence. Dans la gamme de turbinage analysée, le choix d'utiliser le tunnel d'amenée vers les turbines de Heid de Goreux ne dépendrait pas directement de la puissance du turbinage. Cependant, le débit turbiné à Heid de Goreux reste proportionnellement bien plus important et donc plus attractif que celui passant par l'exutoire lors des deux déversements ou par la vanne mobile lors du premier déversement.

- *Influence de la hauteur d'eau dans le débit réservé et de la taille des smolts sur le temps de parcours entre Lorcé et Heid de Goreux*

Les données de hauteurs d'eau dans le débit réservé étant les seules données disponibles en aval de Lorcé, l'étude de la relation entre la hauteur d'eau moyenne du débit réservé lors du passage du poisson à travers ce débit réservé n'a montré aucune influence sur le temps de parcours. Cependant, les hauteurs d'eau observées durant les suivis comportementaux de 2016 étaient très faibles et comprises dans une gamme de 2cm pour une rivière d'en moyenne 30m de large, ce qui est très restrictif.

Nous avons observé que la taille pouvait influencer le temps de parcours dans ce débit réservé. En effet des individus plus grands avec une meilleure capacité de nage (Baudoin *et al.*, 2014), parviendraient statistiquement à atteindre plus rapidement la fin du débit réservé.

5. Conclusions et perspectives

Au terme de cette convention de recherche financé par la DGO3 en complément au projet FEP (Fonds Européens pour la pêche, code projet : 32-1202-006 ; Benitez et al., 2015), les objectifs initialement prévus ont été atteints. L'objectif principal de cette année de suivis comportementaux par technologie RFID était d'étudier l'évolution de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison de Lorcé et le choix des différentes voies de passage selon deux tests. Les deux configurations tests, proposées dans les conclusions du projet FEP, étaient :

- L'abaissement partiel en continu d'une vanne mobile du barrage
- L'ajout d'un entonnement devant l'entrée de l'exutoire

Les suivis RFID réalisées avec des smolts de saumon atlantique lors de ces deux configurations expérimentales ont démontré que l'abaissement partiel en continu d'une vanne mobile du barrage de Lorcé ne diminue pas l'utilisation des turbines de Heid de Goreux comme voie de passage. En effet, cette lame d'eau de 15cm de haut sur 17m de large s'est montrée peu attractive par rapport aux autres voies de passage. En revanche, l'ajout de l'entonnement à l'entrée de l'exutoire a permis d'améliorer l'attractivité, l'efficacité réelle et l'efficacité corrigée, et ainsi de minimiser l'utilisation des turbines comme voie de passage. Cependant, les taux d'efficacité obtenus, même si fortement améliorés avec l'entonnement, restent faibles et insuffisants par rapport à des valeurs obtenues sur d'autres sites et renseignées dans la littérature (voir discussion). Enfin, notre étude a démontré que les poissons qui empruntent le débit réservé pour dévaler vers Heid de Goreux sont confrontés à des conditions hydrauliques défavorables, qui allongent trop fortement la vitesse de parcours sur ce tronçon de 8,2km. Ainsi, si le passage des smolts par l'exutoire est bénéfique car il évite le passage via les turbines, il est nécessaire de revoir à la hausse la valeur du débit réservé, et, prioritairement durant la période de migration des smolts.

Compte tenu de tous ces éléments, il apparaît que trouver la solution idéale pour permettre la dévalaison des poissons au niveau du site du barrage de Lorcé est un défi d'une grande complexité technique. Cependant, les résultats obtenus au cours de ces dernières années ont permis de faire évoluer notre connaissance du problème et de dégager des perspectives pour le futur. Dans sa configuration actuelle, l'exutoire de dévalaison n'est pas assez efficace et il faut envisager des solutions plus ambitieuses pour le futur.

Perspectives d'aménagement et d'étude :

- 1) Condamner l'exutoire de dévalaison et prévoir un remplacement de la vanne secteur du barrage de Lorcé pour l'utiliser comme voie de passage par les poissons. Tout en maintenant le rôle initial de la vanne secteur (vidange du plan d'eau amont), la création

d'une ouverture modulable (abaissement plus important durant le début de nuit et en période de migration) avec un débit de fonctionnement minimum bien plus important qu'actuellement pourrait être imaginé.

- 2) Modifier en profondeur (génie civile) la structure actuelle de l'exutoire de dévalaison afin d'augmenter le débit entrant et améliorer la courantologie de son entrée comme le démontre l'ajout d'un entonnement, mais à plus grande échelle.

En complément à ces propositions, certaines solutions proposées dans le rapport FEP exutoire de Lorcé (Benitez et al., 2015) restent possibles. En effet, il existe des mesures à prendre à l'échelle du barrage hydroélectrique qui sont envisageables :

- La modification de l'espacement des barreaux, actuellement de 41mm, ce qui est plus large que la taille recommandée pour les salmonidés en dévalaison vers la mer (entre 15 et 20mm pour Larinier & Travade 1999). Une étude en Suède a démontré que la présence d'une grille avec des barreaux trop espacés est associée une efficacité médiocre d'un exutoire pour les smolts de saumon alors que celui-ci est parfaitement adapté pour les adultes dévalants post-reproduction (Calles et al., 2012). Cependant la mise en place d'une telle grille fine nécessiterait de gros aménagements et un entretien plus régulier car les déchets favoriseraient le colmatage et entraîneraient une baisse de rendement de production électrique par perte de charge.

- Placer une barrière comportementale de type louvers (=lames verticales orientées à 90° par rapport à la direction du courant) pour empêcher les smolts d'entrer dans la prise d'eau des turbines, et sans devoir changer l'espacement de la grille. L'intérêt des louvers est qu'ils forcent également les smolts à rentrer dans l'exutoire grâce à l'augmentation de la vitesse du courant à son entrée et aux turbulences engendrées par les lames (Larinier & Travade 1999). Cependant les louvers sont complexes à mettre en place (encombrant) et peuvent se montrer coûteux à maintenir en état (Courret & Larinier 2008). En effet, l'accès au lieu de placement sur le site de Lorcé sera certainement difficile pour des machines de chantier, indispensables à la mise en place.

Comme perspective d'étude à court terme, avant de prendre des décisions sur les modifications à apporter en amont du barrage de Lorcé, il serait intéressant de tester l'impact de l'augmentation du débit réservé sur la vitesse de migration des smolts dans le tronçon aval du barrage de Lorcé. Le déversement et le suivi RFID de plusieurs lots de smolts dans le débit réservé, et dans des conditions de débits croissants permettrait de fixer plus objectivement une valeur seuil à maintenir au printemps afin de faciliter la dévalaison des smolts dans ce tronçon de l'Amblève.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement le service de la SPW-DGARNE-DGO3-DCENN, via Ir. P. Orban et O. Detrait pour le financement de l'étude et la confiance qu'ils nous témoignent. Nous exprimons nos plus vifs remerciements à la société Engie-Electrabel, représentée par M. L. François et M. Locht pour leur collaboration durant toute la durée de l'étude et leur autorisation d'accès aux différents sites. Nous remercions aussi particulièrement l'équipe du Service de la Pêche de la DNF : représenté par son Directeur Dr. X. Rollin ainsi que ses agents de la pisciculture d'Erezée : Y. Neus, Delbruyere B., Bayard J. et D. Gilson pour leur collaboration dans l'acquisition des smolts de salmonidés et le marquage. Merci aussi aux membres du comité d'accompagnement pour leur participation active aux réunions : P. Schmitt (CR Amblève), A. Gillet (DGO2), C. Keulen (DCENN), C. Poncelet (DCENN) et S. Vandresse (DCENN).

7. Références bibliographiques

- 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*, 95-102. doi: 10.1023/A:1021306907338
- Arnekleiv, J. V., Kraabøl, M., & Museth, J. (2007). Efforts to aid downstream migrating brown trout (*Salmo trutta* L.) kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway. *Hydrobiologia*, *582*(1), 5-15. doi: 10.1007/s10750-006-0547-8
- Assani, A. A., Petit, F., Buffin-Bélanger, T., & Roy, A. G. (2003). Spatio-temporal variability of the Warche river morphology upstream from Bütgenbach dam (Belgium). *Zeitschrift für Geomorphologie*, *47*(4), 469-483.
- Baudoin, J. M., Bergun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., Steinbach, P. and Voegtle, B. (2014). *Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application.*: Onema.
- Benitez, J.-P. D., A. , Brédart, D., Grandry, L., Hazen C. & Ovidio, M. (2013). Caractérisations des comportements de dévalaison et de montaison de poissons migrateurs en vue d'une optimisation et d'une conception des dispositifs de franchissement sur deux sites hydroélectriques de l'Amblève. Rapport final du projet financé par le Fonds européen pour la Pêche (Code projet: 32-1002-004) et la Direction des Cours d'eau Non Navigables, Service Public de Wallonie. In LDPH ULg, Liège (Ed.), (pp. 214 pages).
- Benitez, J. P., Nzau Matondo, B., Dierckx, A., & Ovidio, M. (2015a). An overview of potamodromous fish upstream movements in medium-sized rivers, by means of fish passes monitoring. *Aquatic Ecology*. doi: 10.1007/s10452-015-9541-4
- Benitez, J., Nzau Matondo, B., Bunel, S., Spronck, C., & Dierckx, A. (2015b). *Evaluation scientifique de l'efficacite d'un dispositif de monitoring de la devalaison des poissons sur un site hydroelectrique de la zone a ombre de l'ambleve. Rapport final du projet financé par le Fonds européen pour la Pêche (Code projet : 32 - 1202 -006).*

- 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. doi: 10.1007/s11852-013-0237-4
- 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. doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.05.002
- 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 radiotélémétrie. *BFPP - Bulletin Français de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques*, *72*(353-354), 99-120.
- Courret, D. L., M. (2008). Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport GHAAPPE RA.08.04. (pp. 72).
- Croze, O., Chanseau, M., & Larinier, M. (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 Camon sur la Garonne. *BFPP - Bulletin Français de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques*, *72*(353-354), 121-140.
- Fjeldstad HP, Uglem I, Diserud OH, Fiske P, Forseth T, Kvingedal E, Hvidsten NA, Økland F, Järnegren J. 2012. A concept for improving Atlantic salmon *Salmo salar* smolt migration past hydro power intakes. *Journal of Fish Biology* 81: 642–663.
- Gosset C, Travade F. 1999. Devices to aid downstream salmonid migration: behavioral barriers. *Cybum* 23: 45–66.
- Gustafsson, S. (2010). Migration losses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts at a hydropower station area in River Åbyälven, Northern Sweden : passage fates at a reservoir, a power house and a bypass structure. *Fish and Environmental Studies, Second cycle, A1E*. Umeå: SLU, Dept. of Wildlife.
- Handeland, S. O., Wilkinson, E., Sveinsbø, B., McCormick, S. D., & Stefansson, S. O. (2004). Temperature influence on the development and loss of seawater tolerance in two fast-growing strains of Atlantic salmon. *Aquaculture*, *233*(1-4), 513-529. doi: 10.1016/j.aquaculture.2003.08.028
- Harvey, B. C. (1987). Susceptibility of Young-of-the-Year Fishes to Downstream Displacement by Flooding. *Transactions of the American Fisheries Society*, *116*(6), 851-855. doi: 10.1577/1548-8659(1987)116<851:SOYFTD>2.0.CO;2
- Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, *11*(3-4), 332-351. doi: 10.1007/BF02503356
- Jepsen, N., Aarestrup, K., Økland, F., & Rasmussen, G. (1998). Survival of radio-tagged Atlantic salmon (*Salmo salar* (L.)) and trout (*Salmo trutta* L.) smolts passing a reservoir during seaward migration. *Hydrobiologia*, *371-372*, 347-353.
- Kemp, P. S., Gilvear, D. J., & Armstrong, J. D. (2006). Variation in performance reveals discharge-related energy costs for foraging Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Ecology of Freshwater Fish*, *15*(4), 565-571. doi: 10.1111/j.1600-0633.2006.00200.x
- 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*, 31-37. doi: 10.1023/A:1021390403703

- Larinier, M., & Boyer-Bernard, S. (1991). Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*(321), 72-92.
- Larinier, M., & Travade, F. (1999). Downstream migration : Problems and facilities. *BFPP - Bulletin Français de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques*, 72(353-354), 181-210.
- 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. doi: 10.1890/10-0593.1
- 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(SUPPL.1), 77-92.
- Norrgård, J. R., Greenberg, L. A., Piccolo, J. J., Schmitz, M., & Bergman, E. (2013). Multiplicative loss of landlocked atlantic salmon SALMO SALAR I. Smolts during downstream migration trough multiple dams. *River Research and Applications*, 29(10), 1306-1317. doi: 10.1002/rra.2616
- Ovidio, M., Neus, Y., Rimbaud, G., Otte, D., Dewespin, A., Courtois, J. & Philippart, J.C. (2007). Caractérisation des patrons de mobilité de salmonidés et de cyprins rhéophiles dans la zone d'influence de la centrale hydro-électrique de Heid de Goreux (Amblève). Implications pour la mise en place de la nouvelle échelle à poissons de Lorcé. Rapport final au Ministère de la Région Wallonne, DGRNE-Division de l'Eau, Direction des Cours d'eau non navigables. Université de Liège, Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie, (avril 2007) (pp. 83 pages).
- Ovidio, M. e. P., J.C. (2009). Développement d'une méthodologie de fixation des conditions d'exploitation des centrales hydro-électriques sur les cours d'eau non navigables de Wallonie afin de limiter leur impact sur la qualité écologique et les ressources piscicoles des milieux. Tome 3. Evaluation d'aménagements de protection environnementale en place ou sur le point d'être construits au niveau de sites hydroénergétiques. Rapport d'études (Convention octobre 2007-septembre 2009 Visa n° 07/13407) au SPW-DGARNE, Direction des Cours d'Eau Non Navigables. *Université de Liège (UBC-LDPH)*, 75 pages.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Bredart, D., Rimbaud, G. & Philippart, J.C (2011). Appui scientifique et technique à la mise en place d'actions visant à la libre circulation des poissons dans les cours d'eau non navigables de Wallonie. Université de Liège de Liège, Laboratoire de démographie des poissons et d'hydroécologie, 37 pages.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Matondo, B.N., Benitez, J.P., Philippart, J.C., Bernard, B., Mandiki, R., Evrard, A. Kestemont (2015). Rapport final annuel 2015 au Service Public de Wallonie (DGARNE/DNF-SP) de la Subvention 2014-2015 relative au suivi scientifique de la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse. In U. d. L. e. U. d. Namur (Ed.), (pp. 133).
- Ovidio, M., Hanzen, C., Gennotte, V., Michaux, J., Benitez, J., & Dierckx, A. (2016). Is adult translocation a credible way to accelerate the recolonization process of *Chondrostoma nasus* in a rehabilitated river ? by, 40(1), 43-49.
- 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. doi: 10.1007/s10750-006-0557-6

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. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.089