



LIFE4FISH



LIFE4FISH

RAPPORT DE SUIVI TELEMETRIQUE DES SMOLTS DE SAUMON ATLANTIQUE DURANT LA PHASE DE TEST PILOTE DE MESURES DE PROTECTION SUR LES SITES HYDROELECTRIQUES DE LUMINUS

LIFE16 NAT/BE/000807 : Downstream migration along the low Meuse River

Auteurs : Lerquet, M. ; Colson, D. ; Beguin, J. & Sonny, D.

RAPPORT MILESTONE

V1.0

15/12/2021



TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION	4
2 MATÉRIEL ET MÉTHODES	5
2.1 DESCRIPTION DU MATÉRIEL.....	5
2.2 IMPLANTATION DU RÉSEAU TÉLÉMÉTRIQUE EN RELATION AVEC LES MESURES DE GESTION ÉTUDIÉES	5
2.3 MARQUAGE ET RÉPARTITION DES SMOLTS	13
2.4 TÉLÉCHARGEMENT DES DONNÉES DES HYDROPHONES	14
2.5 TRAITEMENT DES DONNÉES NON SPATIALISÉES	16
2.6 TRAITEMENT DES DONNÉES SPATIALISÉES	16
RÉSULTATS.....	18
2.7 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR L'ASPECT MATÉRIEL.....	18
2.8 PRÉSENTATION DES JEUX DE DONNÉES	19
2.9 CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DURANT L'ÉTUDE.....	21
2.10 SYNTHÈSE DES FRANCHISSEMENTS SUR CHAQUE SITE.....	22
2.12 SUCCÈS DE DÉVALAISON GLOBAL	31
3 DISCUSSIONS.....	33
3.1 RETOUR DE PERFORMANCE DES ÉQUIPEMENTS INSTALLÉS	33
3.2 FRANCHISSEMENT DES OUVRAGES ET SUCCÈS DE MIGRATION.....	34
3.3 HEURE D'ARRIVÉE DES SMOLTS SUR LES DIFFÉRENTS SITES	35
4 BIBLIOGRAPHIE.....	37



Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des organismes et personnes dont le concours a permis le bon déroulement de l'étude, en particulier :

Les gestionnaires et les exploitants des centrales de Luminus, pour leur accueil, leur collaboration, leur flexibilité et leur convivialité durant l'étude.

Le SPW-DGO2 – Voies Hydrauliques District de Liège et Namur pour les autorisations obtenues dans le cadre de la pose des hydrophones au droit des barrages.

Le SPW Mobilité et Infrastructures, Département Expertises Hydraulique et Environnement, Direction de la Gestion Hydraulique, pour l'envoi des données de débit des stations de la Meuse ainsi que les cotes d'ouverture des clapets de barrage.

Le SPW – DNF - Service de la Pêche pour la fourniture gracieuse des smolts en provenance de la pisciculture d'Erezée, en particulier Yvan Neus pour sa collaboration précieuse.



1 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'action D2, Profish a la charge du suivi de l'efficacité des mesures de gestion pilotes qui ont été mises en œuvre sur les sites sélectionnés pour augmenter la survie des anguilles argentées et des smolts de saumon atlantique. Le présent rapport se concentre sur l'observation, par télémétrie, des comportements d'approches et de franchissements des smolts de saumon atlantique au droit des ouvrages équipés de mesures de protection. Le suivi relatif aux anguilles argentées avait déjà été réalisé en 2019-2020 et avait fait l'objet de rapport Milestone (Lerquet et al. 2020) et ainsi que d'un livrable sur les mesures d'efficacité (Sonny et al. 2020).

En 2017, préalablement au lancement du programme LIFE4FISH, un état initial établissant les voies de franchissements des deux espèces au droit des 6 sites en condition de fonctionnement normal avait été réalisé. C'est de cette étude que sont tirées les données qui définissent l'impact initial sur chaque site. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur vers ces rapports (Roy et al. 2018 ; Sonny et al. 2018).

Le présent suivi vise à mesurer, selon la même technique, l'évolution de la proportion de smolts qui empruntent les différentes voies de franchissement (centrale, barrage, écluse, bypass) en présence d'une mesure de gestion mise en œuvre sur les sites pilotes : barrière électrique et bypass à CH Grands-Malades et lame d'eau attractive sur un pertuis (rive droite) à CH Ivoz-Ramet. Dans la mesure où un grand nombre de poissons marqués allaient passer au droit des sites de CH Monsin et CH Lixhe, ces deux sites ont également été instrumentés d'hydrophones de manière à y observer également les voies de passages.

L'efficacité des mesures fait l'objet d'un second rapport, correspondant au livrable de l'action D2 (Sonny et al. 2021).

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 Description du matériel

Le suivi s'est déroulé au moyen de la télémétrie acoustique, méthode qui avait été désignée par Luminus puis mise en œuvre par Profish lors des tests de 2017. Lors de premiers tests préliminaires (Roy et al. 2017), Profish avait comparé les portées de détection de différents types de signaux acoustiques, et avait sélectionné la technologie JSAT, dont les signaux codés sont émis à la fréquence de 416.7 kHz, comme meilleure technologie disponible. A l'époque, Luminus avait donc acquis un lot de 80 hydrophones LOTEK WHS 4250.

En toute logique, ces équipements ayant été acquis dans la perspective d'études sur le long terme, c'est donc selon la même technique que le suivi smolts 2021 a été réalisé.

2.2 Implantation du réseau télémétrique en relation avec les mesures de gestion étudiées.

2.2.1 Méthodes d'implantations des hydrophones

Les hydrophones ont été placés en différents points sur chaque site étudié grâce à trois méthodes distinctes selon l'accessibilité de ces points : depuis la rive / culées de barrages (Figure 1) ou depuis un bateau (Figures 2 et 3).

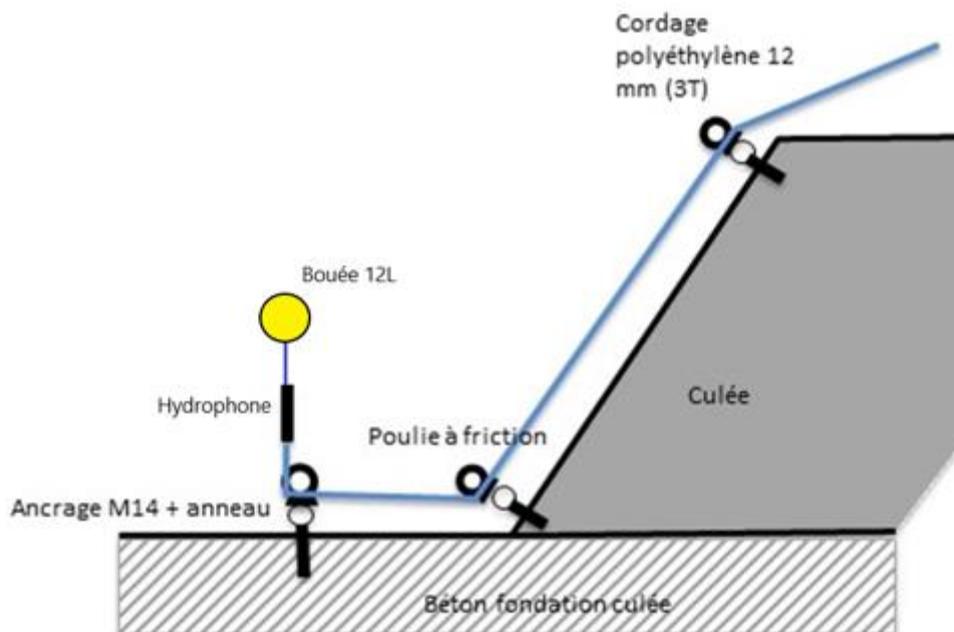


Figure 1 : Schéma du système d'implantation d'un hydrophone accessible depuis la rive ou une culée de barrage.

Avec ce dispositif, l'opérateur en charge de la mise en place de l'hydrophone fixe celui-ci à 50cm sous la bouée depuis la rive et immerge le système de façon que l'hydrophone soit à environ 1m au-dessus du fond.

Lors du téléchargement mensuel des données, l'opérateur doit libérer la corde qui maintient la bouée immergée et la ramener sur la rive à l'aide d'un grappin ou d'une gaffe pour pouvoir accéder à l'hydrophone.

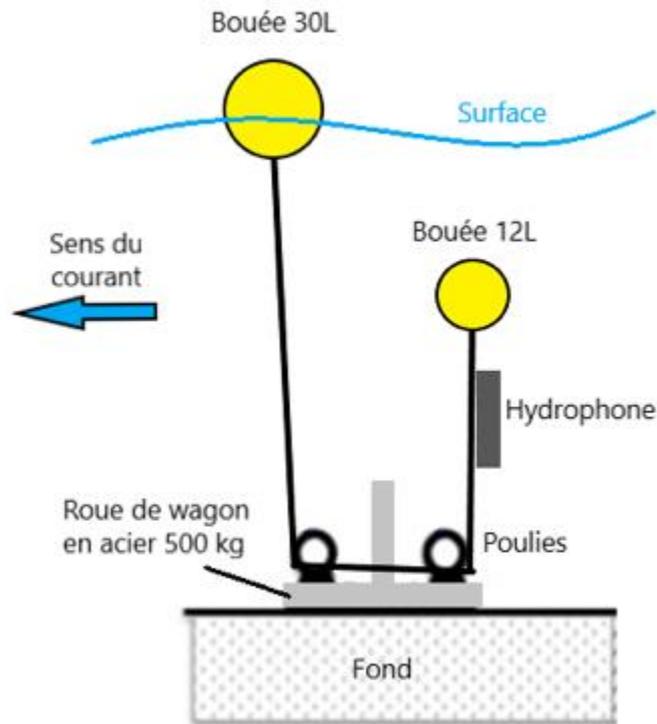


Figure 2 : Schéma d'implantation d'un hydrophone accessible depuis un bateau

Ce second système est utilisé pour positionner les hydrophones permettant le mapping 2D des trajectoires des poissons à l'approche des ouvrages hydroélectriques (Grands-Malades et Ivoz-Ramet). Le corps mort servant de point d'ancrage est constitué d'une roue de wagon en acier de 500kg sur laquelle ont été soudées 2 poulies. Ce dispositif est immergé grâce à une grue et positionné ensuite dans la rivière par des plongeurs via un parachute de flottaison. L'hydrophone est fixé 50cm sous la petite bouée (12L) puis immergé jusqu'à 1m au-dessus du fond, une plus grosse bouée (30L) permet de maintenir le système en tension et de récupérer l'hydrophone, au moment du téléchargement, lorsque celle-ci est libérée.

Le troisième système (Figure 3) est un ancrage plus léger et simple à mettre en place, idéal pour les conditions printanières et estivales. Il est composé d'une ancre charrue galvanisée de 18kg, d'une chaîne d'une dizaine de mètre et d'une corde de même longueur reliée à une bouée de 30L. L'hydrophone est fixé à la corde à la profondeur souhaitée. L'ensemble du dispositif peut être mis en place n'importe où dans la Meuse depuis un bateau, lorsque c'est possible, un câble relie l'ancre à la berge pour éviter que le dispositif soit emporté par des crues printanières.

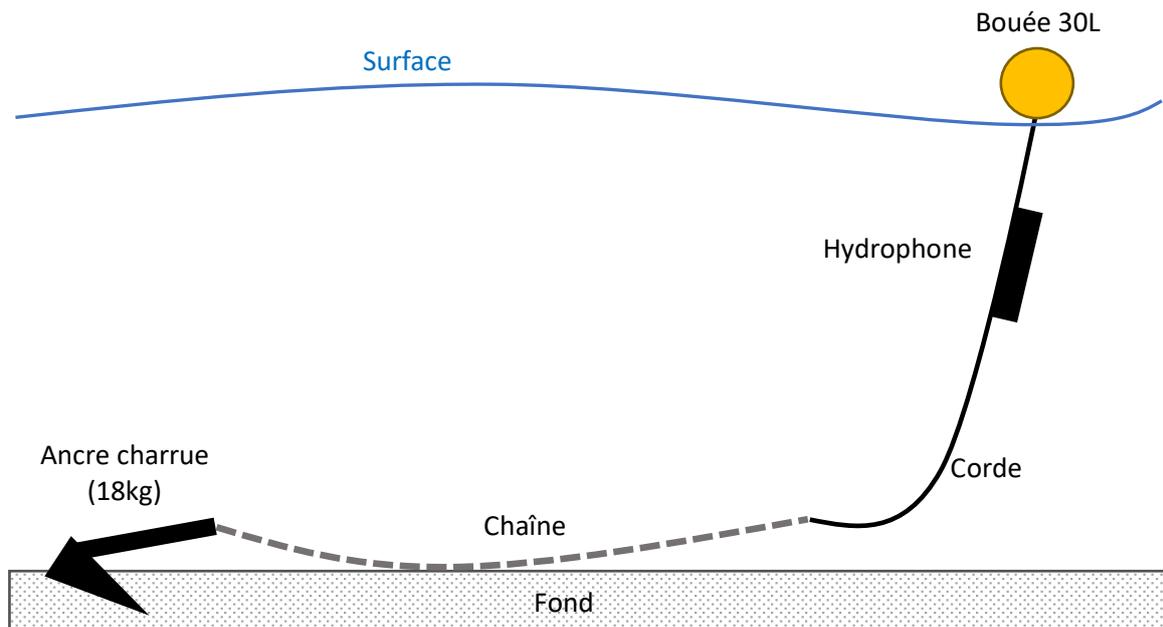


Figure 3 : Schéma d'implantation d'un hydrophone sur ancre, placé depuis un bateau.

Les hydrophones utilisés pour ce suivi sont de la marque LOTEK®, modèle WHS 4250. Ces hydrophones ont déjà servi aux précédents suivis de dévalaison des smolts ou des anguilles en Meuse.

Un nouveau type d'hydrophone de la marque ATS® (Figure 4), modèles SR3017 (On-shore) et SR3001 (Off-shore), ont été utilisés pour couvrir les prises d'eau d'Ivoz-Ramet et Monsin.



Figure 4 : A gauche: ATS SR3017 (On-shore). A droite: ATS SR3001 (Off-shore).

2.2.2 Dispositif de suivi à Grands-Malades (CHG)

Préalablement aux suivis comportementaux, le site de CHG a fait l'objet de l'implantation de 2 dispositifs de protection.

En premier lieu, un exutoire de dévalaison (bypass) a été aménagé dans la culée qui sépare la rive gauche du canal d'amenée du barrage. Cet aménagement fait l'objet d'un dimensionnement dans l'action A3 (Epicum et al. 2019) et a été implanté sur site dans le cadre de l'action C1 (Murillo Calvo & Leysens 2021). Son débit d'équipement nominal est de 3.4 m³/s. Les détails techniques relatifs au dimensionnement et au principe constructif sont détaillés dans les rapports précités. L'exutoire a pour objectif de faciliter le transit des smolts entre la prise d'eau où ils ont tendance à se concentrer et l'aval du site.

En complément du bypass, la prise d'eau de CHG a été équipée de 2 barrières électriques (Figure 5) répulsive pour les poissons migrateurs. La barrière en entrée de prise d'eau (B1 sur la Figure 5) installée en 2019, avait pour but d'empêcher les anguilles européennes de se diriger vers les turbines lors de leur dévalaison en automne-hiver. Cette barrière a déjà fait l'objet d'une étude en 2019-2020 après sa mise en fonction (Sonny et al. 2020). Pendant toute la durée de l'étude actuelle, cette barrière comportementale n'a pas été mise en service. La seconde barrière électrique (B2 sur la Figure 5) a été implantée en octobre 2020 par le fabricant Procom System, au milieu de la prise d'eau de Grands-Malades et orientée en oblique vers l'entrée du bypass. Le but recherché étant de guider les smolts qui se présentent dans la prise d'eau vers le bypass.

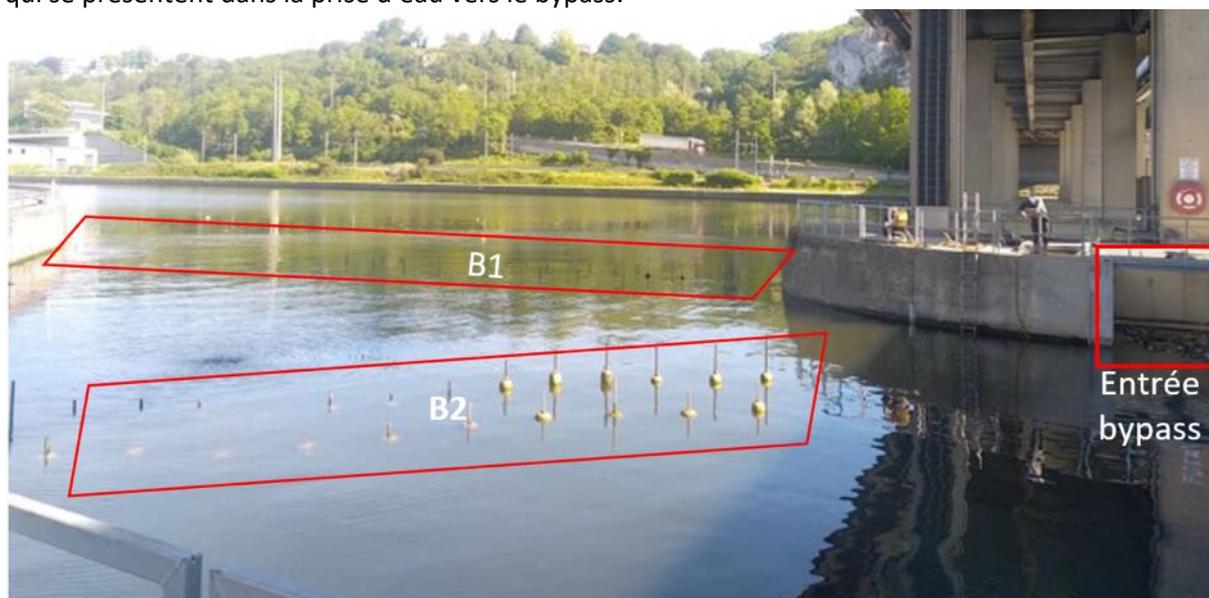


Figure 5 : Vue de la prise d'eau de la centrale hydroélectrique de Grands-Malades avec les 2 barrières comportementales (B1 et B2) installées ainsi que l'entrée du bypass.

Dans le but d'observer les comportements d'approche au droit de ces dispositifs, le site de Grands-Malades (barrage, centrale, écluse, bypass et station aval) a été équipé d'un total de 16 hydrophones depuis le 25/03/2021 afin d'établir les voies de passages des smolts (Figure 6).

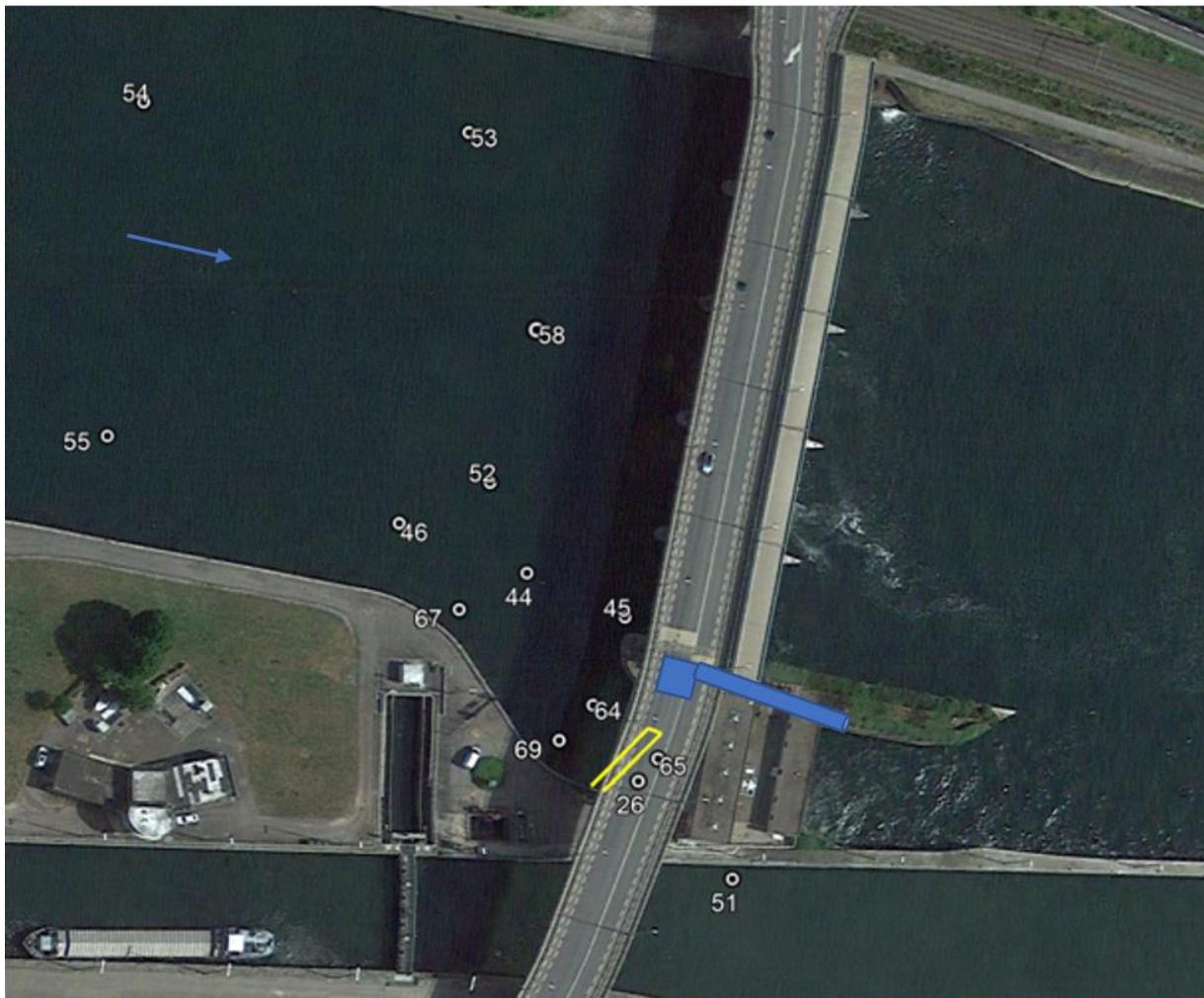


Figure 6 : Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (cercles blancs numérotés) implanté sur le site de Grands-Malades, la barrière électrique est représentée en **jaune**. Le bypass est représenté en **bleu**. Le sens du courant est représenté par la **flèche bleue**.

Les hydrophones 54 et 55 représentent l'entrée du système, les N° 53 et 58 détectent les franchissements « Barrage ». Les N° 26, 65, 69 et 64 sont les hydrophones pour les franchissements « Turbine » ou « Bypass » (avec confirmation par les antennes RFID pour ce dernier). Les hydrophones 44, 45, 46, 52 et 67 servent à caractériser l'approche des smolts au droit de la prise d'eau. L'hydrophone 51 couvre l'écluse et deux autres appareils ont été placés en aval (500m) pour valider les franchissements et représentent la sortie du système CHG. Ces zones de détection se superposent partiellement, si bien que la validation d'une voie de passage requiert un arbre de décision qui tient compte du fonctionnement des organes du barrages et de la turbine ainsi que des patrons de détection.

Les tests préliminaires de la technologie acoustique dans le bypass n'ayant pas été concluant en raison du bruit important généré par les remous et les bulles, il a été décidé dans un premier temps d'y mettre en place un dispositif de captures des smolts au moyen d'un grand filet relié à une cage de capture flottante (Figure 7). Ce dispositif était par ailleurs nécessaire à l'équipe de UNAMUR pour vérifier l'état sanitaire des smolts après le passage dans le bypass dans le cadre de l'Action A2.

Le filet était attaché à des ancrages mécaniques M16 implantés dans le mur en béton et maintenu en place par un système de cordes et de poulies. Le ponton et la cage étaient en partie maintenus par le filet mais également positionnés grâce à 4 cordes attachées de part et d'autre des rives.



Figure 7 : vue du dispositif de capture des smolts constitué du filet accroché à la paroi autour de la sortie de l'exutoire et relié à une cage suspendue par un ponton flottant, accessible depuis l'aval par bateau.

Le filet a été déchiré sur une grande partie durant la première nuit de suivi de la première campagne. Des captures ont pu être réalisées dans le cadre de l'Action A2, qui n'a pas été pénalisée par cet incident, mais il s'est cependant avéré impossible de valider le passage des smolts par le bypass pour ce premier lot. Il a alors été décidé d'installer deux antennes RFID en entrée et sortie du bypass le 16/04/2021 (Figure 8) pour valider les passages ou les approches des poissons dans la structure, au moyen d'un double marquage des smolts (Pit-tags + émetteurs acoustique). Cela a permis ensuite de suivre 2 lots de smolts pour mesurer l'efficacité de la barrière électrique et du bypass dans deux configurations différentes.



Figure 8 : De Gauche à droite : entrée du bypass en amont du plan de grilles des turbines, intérieur du bypass avec le plan de grille. L'antenne RFID a été installée sur le cadre en bois devant la grille sur toute la section du canal d'entrée, sortie du bypass en aval des turbines. L'antenne RFID a été fixée autour de la canalisation.

Dans une certaine urgence, des essais de détection ont été réalisés avec les smolts disponibles pour déversement de l'action A2. Lors de l'injection de ces smolts pit-tagés à l'entrée du bypass en amont de l'antenne RFID, nous avons noté que les antennes ne détectaient pas chacune 100% des passages, mais que ceux-ci étaient par contre couverts quasi à 100% par au moins une des deux antennes. En conséquence, dans le jeu de données, nous interprétons les données RFID de la manière suivante :

- Détection amont suivi d'une détection aval dans la foulée : passage validé dans le bypass.
- Détection aval uniquement comme dernière détection d'un bloc de détections acoustiques dans la prise d'eau en amont : passage par le bypass validé.
- Détection amont uniquement comme dernière détection d'un bloc de détection acoustiques dans la prise d'eau en amont : passage par le bypass présumé mais non validé.
- Détection amont uniquement suivie d'un bloc de détections dans la prise d'eau : entrée validée mais passage infructueux avec retour du poisson vers la prise d'eau.

2.2.3 Dispositif de suivi à Ivoz-Ramet (CHR)

Le site d'Ivoz-Ramet a été équipé avec un total de 11 hydrophones depuis le 23/03/2021 (Figure 9): 2 dans la prise d'eau (ATS SR3017 – 83 et 32), 5 pour couvrir l'approche de la prise d'eau et du pertuis avec la lame d'eau étudiée (77-83-84-75-74), 2 hydrophones installés au niveau des navistops représentent l'entrée du système (80-82) et 2 hydrophones couvrent les deux écluses du site (60-36). 2 hydrophones supplémentaires ont été placés 1500m en aval pour confirmer les franchissements et représentent la sortie du système.

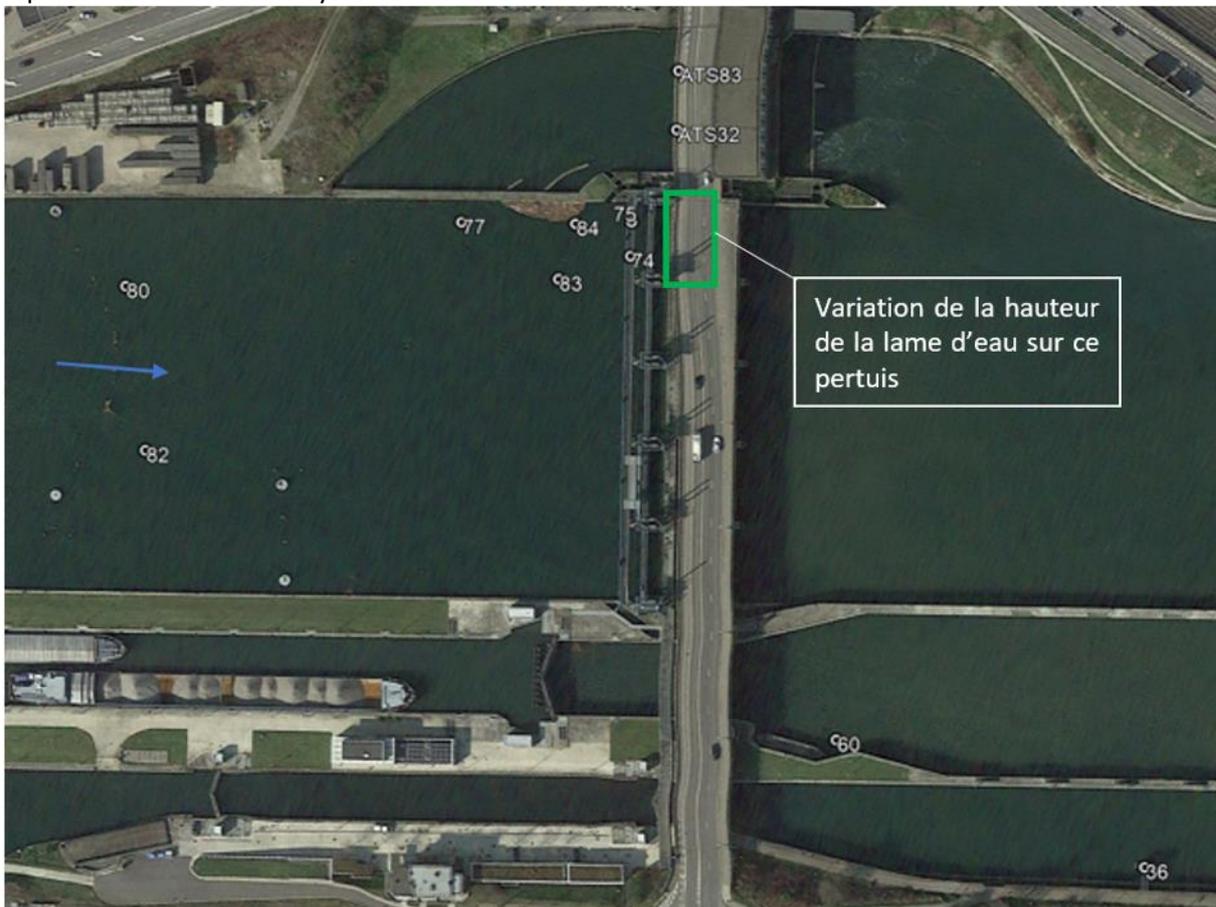


Figure 9 : Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (cercles blancs numérotés) implanté sur le site d'Ivoz-Ramet. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue.

Pour le site d'Ivoz-Ramet, après l'examen de plusieurs scénarii, il a finalement été décidé de mettre en place une mesure de gestion pour la dévalaison des smolts visant à augmenter l'attractivité du barrage en ouvrant le pertuis du barrage situé en rive gauche, le plus proche de la centrale, à différentes hauteurs d'eau, pour déterminer si ces débits déversés peuvent dérouter les smolts de la prise d'eau de la centrale hydroélectrique.

2.2.4 Ourthe, Monsin et canal Albert

Le site de Monsin est équipé avec un total de 5 hydrophones depuis le 29/03/2021 (Figure 10): 3 dans la prise d'eau (ATS54-55), 3 sur le barrage (28, 29, 30) et 2 en station aval (500m). Le barrage de Monsin étant en travaux, lors de la mise en service des hydrophones, les 4 vannes du barrage en partant de la rive gauche n'étaient pas fonctionnelles. Dès lors durant le suivi 2021, Luminus a demandé au SPW de maintenir une lame d'eau de 90 cm sur le pertuis rive droite durant la durée de la dévalaison définie par le modèle prédictif (Action A4, Teichert et al. 2019, Teichert et al. 2020). L'embouchure du canal Albert est équipée avec 2 hydrophones (N°31 et 33) sous le pont Marexhe.

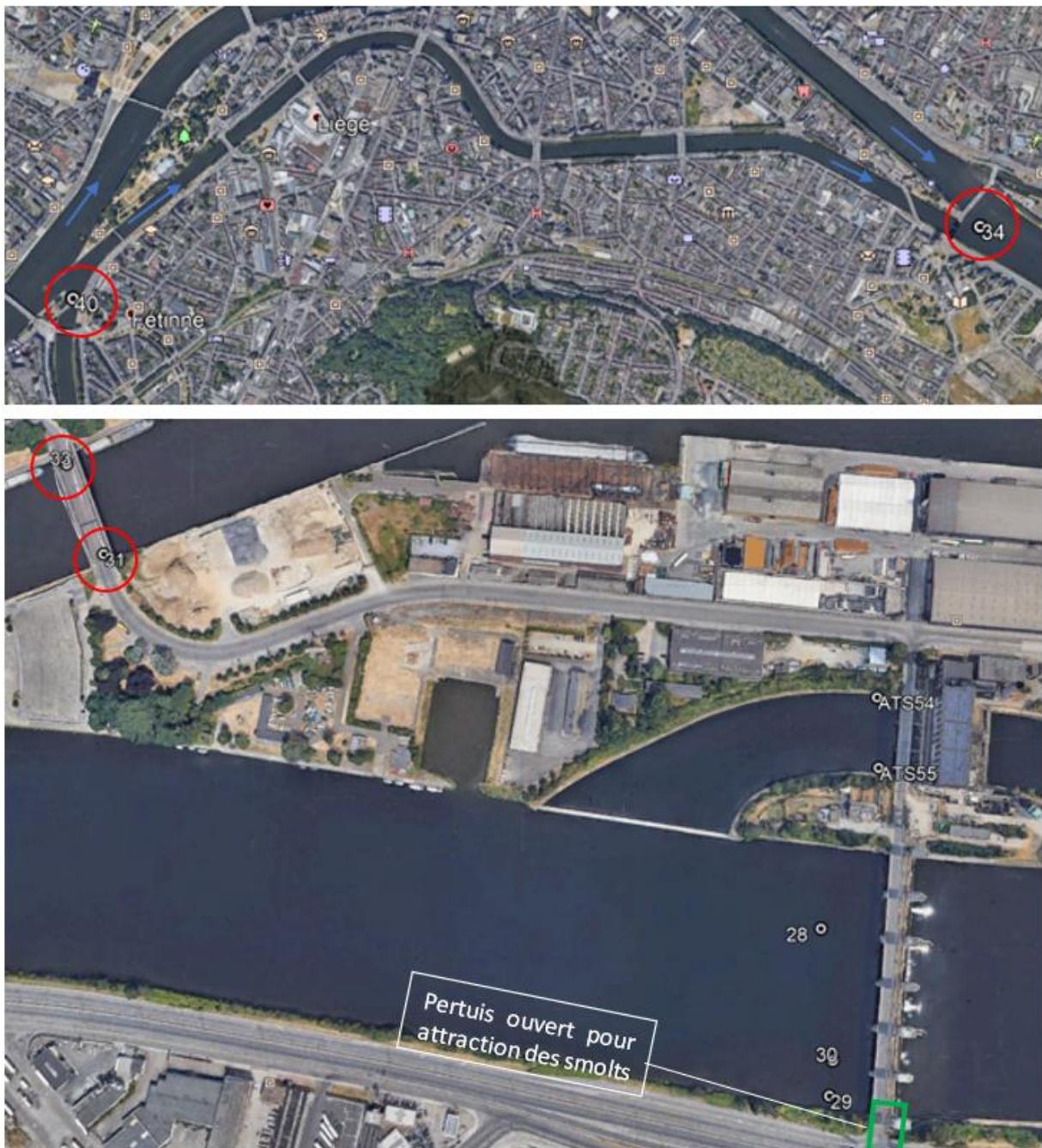
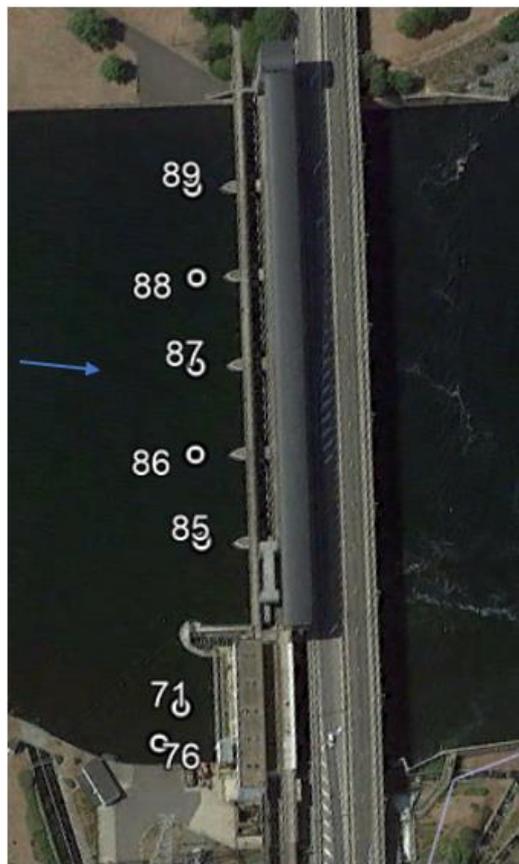


Figure 10 : En haut : Position des hydrophones en Ourthe et à la confluence. En bas : Réseau d'hydrophones à Monsin et canal Albert.

La prise d'eau a été équipée avec 2 hydrophones ATS SR3001 (off-shore). 2 hydrophones LOTEK installés 500 m en aval permettent de confirmer les franchissements par le barrage et représentent la sortie du système « Monsin ».

2.2.5 Lixhe



Depuis le 26/03/2021, 5 Hydrophones ont été installés sur le barrage (89-88-87-86-85) et 2 dans la prise d'eau de la centrale de Lixhe (71-76). 2 hydrophones supplémentaires ont été placés 3,5km en aval pour confirmer le franchissement et représentent la sortie de l'ensemble du réseau de la Meuse (Figure 11).

Figure 11 : Réseau d'hydrophone de Lixhe

2.3 Marquage et répartition des smolts

2.3.1 Biométrie et marquage des smolts

Un total de 237 smolts, fournis par la pisciculture d'Erezée, ont été équipés d'émetteurs acoustiques (L-AMT 5.1 b, 13 mm x 7 mm x 5 mm ; 0.6g) et 86 d'entre eux ont reçu un tag RFID en plus de l'acoustique (23 mm x 3.85 mm ; 0.6g). Le poids minimum requis des smolts pour respecter la règle des 2% était de 30g pour les smolts à simple marquage, et 60g pour les smolts à double marquage. Le poids moyen des smolts utilisés était de 42.8g. Le poids moyen des smolts ayant reçu un double marquage était de 47.8 g. Avec cette biomasse, le poids des 2 tags représentait 2.5% du poids du poisson et était, pour les plus petits individus, de 3%.

L'implantation des émetteurs a été faite à la pisciculture, chaque individu a été anesthésié avec une solution alcoolique d'eugénol 10% à un dosage de 0.5 ml/l, avant de procéder aux mesures biométriques (taille, poids) et à l'opération chirurgicale (Figure 12). L'opération consiste à réaliser une incision de quelques millimètres sur le ventre de l'animal jusqu'à la cavité péritonéale, y insérer les tags préalablement stérilisés dans de l'alcool, et refermer à l'aide d'un ou deux points de sutures. Les individus marqués sont placés dans un bassin de réveil jusqu'à ce qu'ils ne présentent plus aucun signe d'anesthésie. Une fois la totalité des individus marqués, ils ont été immédiatement emmenés sur site (Grands-Malades ou Ivoz-Ramet) où ils sont restés en bassin de stabulation après acclimatation avec

de l'eau de Meuse pendant 24h pour s'assurer de leur bon recouvrement à la suite de l'opération et leur adaptation aux conditions de la rivière.



Figure 12 : Smolt, Tag RFID, Tag acoustique et opération de marquage sous anesthésie

Au terme de ces 24h, les smolts sont déversés par lot soit au pont de Jambes pour les smolts dédiés à l'étude de Grands-Malades (2,5km en amont), soit à Engis en amont d'Ivoz-Ramet (4,25 km) pour les smolts dédiés à l'étude de ce site.

Les 237 individus marqués ont été répartis en 5 lots :

Tableau 1 : Répartition des smolts en 5 lots selon le lieu de déversement, la date et l'heure (UTC)

LOT	N SMOLTS	TAILLE MOYENNE (MM)	POIDS MOYEN (G)	LIEUX	DATE DE DEVERSEMENT
1	51	161,8	41,5	Pont de Jambes	30/03/2021 13:30
2	50	160,1	40,3	Engis	01/04/2021 10:29
3	50	153,8	38,0	Engis	08/04/2021 11:45
4	40	169,8	47,7	Pont de Jambes	20/04/2021 13:20
5	46	169,8	47,8	Pont de Jambes	27/04/2021 11:43

2.4 Téléchargement des données des hydrophones

Le téléchargement des données enregistrées dans les hydrophones a été réalisé régulièrement tout au long de l'étude, de fin mars à la mise en service du réseau à fin mai lors du retrait des hydrophones.

La procédure de téléchargement consiste à accéder à l'appareil depuis la rive ou depuis un bateau grâce aux systèmes de bouées et de poulies décrit plus haut dans ce rapport. L'accès aux données se fait via un câble USB, l'hydrophone est branché à un PC qui communique avec l'appareil via le logiciel WHS Host de LOTEK ou Trident d'ATS. Le logiciel nous permet de réaliser un diagnostic rapide de l'état de l'hydrophone (bonne réception des signaux extérieurs et des beacons). L'hydrophone est ensuite arrêté pour procéder au téléchargement des données qui seront stockées sur le PC puis synchronisées sur le cloud de l'entreprise. Une fois les données acquises, la carte SD de l'hydrophone est vidée, l'horloge interne resynchronisée et remise en fonctionnement en vérifiant le bon déroulement des opérations grâce à l'affichage des détections du beacon en temps réel. L'hydrophone est alors refixé au système de d'ancrage et remis dans sa position initiale jusqu'au prochain téléchargement.



Les données téléchargées depuis les hydrophones sont au format « .JST » et systématiquement copiées au format « .CSV » plus adapté aux traitements statistiques. Ces fichiers contiennent toutes les données concernant l'appareil et son fonctionnement (N° de série, identifiant de l'appareil, état des batteries, durée de fonctionnement, etc...) ainsi que les détections en elles-mêmes. A chaque détection est associé : la date et l'heure à la fraction de seconde près, l'ID de l'émetteur et la puissance du signal, les hydrophones ATS peuvent aussi renseigner la température de l'eau et la position GPS de l'appareil.

Les hydrophones LOTEK sont sujets à une dérive de leur horloge interne par rapport à l'horloge de référence du PC de terrain (en UTC), synchronisé sur l'heure universelle (satellites), utilisée pour tous les téléchargements. Au moment de la récupération des données, la différence de temps est enregistrée pour chaque téléchargement de chaque hydrophone, tous les appareils étaient systématiquement en retard par rapport à l'horloge du PC. La plus faible dérive calculée est de 3,49 secondes/jour, la plus élevée est de 5,15 secondes/jour pour une moyenne de 4,17 secondes/jour pour N = 47 hydrophones LOTEK. Des tests réalisés en 2019 ont permis de déterminer que cette dérive temporelle est linéaire dans le temps, c'est-à-dire qu'elle ne ralentit ni n'accélère au cours de la période de fonctionnement de l'appareil.

$$\Delta_t = \frac{Date_{Réf} - Date_{Hydro}}{Temps\ de\ fonctionnement}$$

Où :

Δ_t = dérive temporelle (seconde / seconde)

Date_{Réf} = Date et heure du PC au moment du téléchargement

Date_{Hydro} = Date et heure de l'hydrophone au moment de du téléchargement

Temps de fonctionnement = nombre de seconde qui se sont écoulées entre le lancement de l'hydrophone et le téléchargement.

L'heure de chaque détection a été corrigée en y ajoutant le laps de temps de retard accumulé par l'hydrophone entre son lancement et le moment de la détection. La correction est traduite par la formule suivante :

$$Date_{Corrigée} = Date_{Enregistrée} + (\Delta_t * (Date_{enregistrée} - Date_{Lancement}))$$

Où :

Date_{Enregistrée} : date/heure de la détection réalisée par l'hydrophone

Date_{Lancement} : date/heure du lancement de l'hydrophone

Δ_t : dérive temporelle (s/s)

Les hydrophones ATS subissent aussi une dérive temporelle, normalement corrigée grâce à une antenne GPS synchronisée sur l'heure des satellites, mais les appareils placés dans les infrastructures couvertes de Luminus (zone des turbines d'Ivoz-Ramet) ne captaient pas de signal. Les logiciels de ces hydrophones n'ont pas permis de relever et corriger manuellement cette dérive temporelle. Les données issues de ces appareils n'ont pas pu être parfaitement synchronisée mais les positions « isolées » des hydrophones ATS (prises d'eau d'Ivoz-Ramet et Monsin) par rapport au reste du réseau d'hydrophones LOTEK (principalement à proximité des barrages), diminuent l'impact d'un décalage de quelques secondes entre la détection d'un poisson et l'heure réelle de sa présence dans les prises d'eau. Aucune aberration due à ce phénomène n'a été relevée lors du traitement des résultats.

2.5 Traitement des données non spatialisées

L'ensemble des données de détections issues des hydrophones a été compilé au sein de bases de données et analysé à l'aide du logiciel R et de scripts automatisés et réutilisables pour chaque campagne.

Une première base de données a été créée et rassemble les détections de l'ensemble des beacons pour chaque hydrophone de chaque site. Celle-ci permet de caractériser la performance de détection de tous les hydrophones pendant le suivi.

Une seconde base de données a été compilée et rassemble uniquement les ID correspondant aux émetteurs de poissons marqués.

Les données brutes qui ont permis de la construire ont dû être filtrées pour éviter des erreurs liées aux bruits présent dans le milieu.

- **Suppression des fausses détections**

Les premières données à supprimer sont les codes enregistrés qui ne correspondent à aucun des ID marqués. Seuls les 237 codes utilisés lors du marquage sont retenus.

- **Suppression des “faux positifs”**

Il arrive que le bruit ambiant génère un code qui est celui d'un ID marqué. Pour parer à ces “faux positifs”, Profish a utilisé un filtre déjà éprouvé lors de précédents suivis. Le principe est de supprimer toute détection pour laquelle il n'existe pas au moins une autre détection dans le réseau d'hydrophones présent à l'amont d'un ouvrage pendant une période Δt définie (Figure 13).

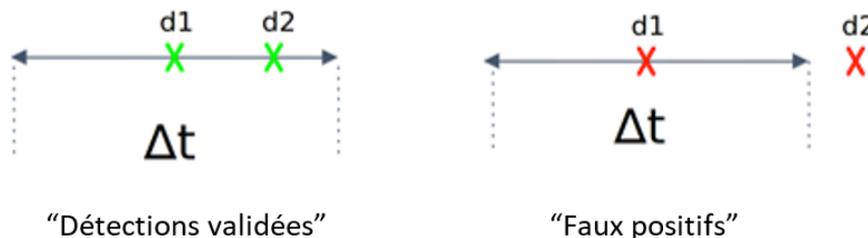


Figure 13 : Principe de filtration des faux positifs pour deux détections 'd1' et 'd2'

Dans le cas présent et dans les études précédentes, différents Δt ont été testés et les meilleurs résultats ont été obtenus avec un filtre de 60 secondes. Après ce traitement, il reste quelques fausses détections facilement identifiables manuellement qui concernent des codes particulièrement exposés au bruit de fond. Une vérification des détections est cependant systématiquement réalisée avec un Δt à 30s et 120s.

En d'autres termes, le délai d'émission d'un tag étant de 3 secondes, une détection a été considérée comme réelle, si dans une plage de 60 secondes autour de cette détection il existe au moins une autre détection du même ID dans le réseau d'hydrophones voisins.

2.6 Traitement des données spatialisées

Sur les sites de Grands Malades, le réseau d'hydrophones installé permet de calculer des positions individuelles à partir des fichiers de détections de chacun des hydrophones. Une procédure réalisée à l'aide du logiciel UMAP, de LOTEK, a permis d'obtenir ces positions pour chacun des individus ayant fréquentés la zone équipée.

L'algorithme de positionnement UMAP permet d'obtenir, pour chaque individu, un jeu de données de positions. Chaque position est décrite par ces coordonnées géographiques en UTM, la date, l'heure,

la valeur de DOP (Dilution of Precision, une valeur d'erreur de positionnement théorique), le nombre d'hydrophones et la liste des hydrophones utilisés pour le calcul de la position (Figure 14).

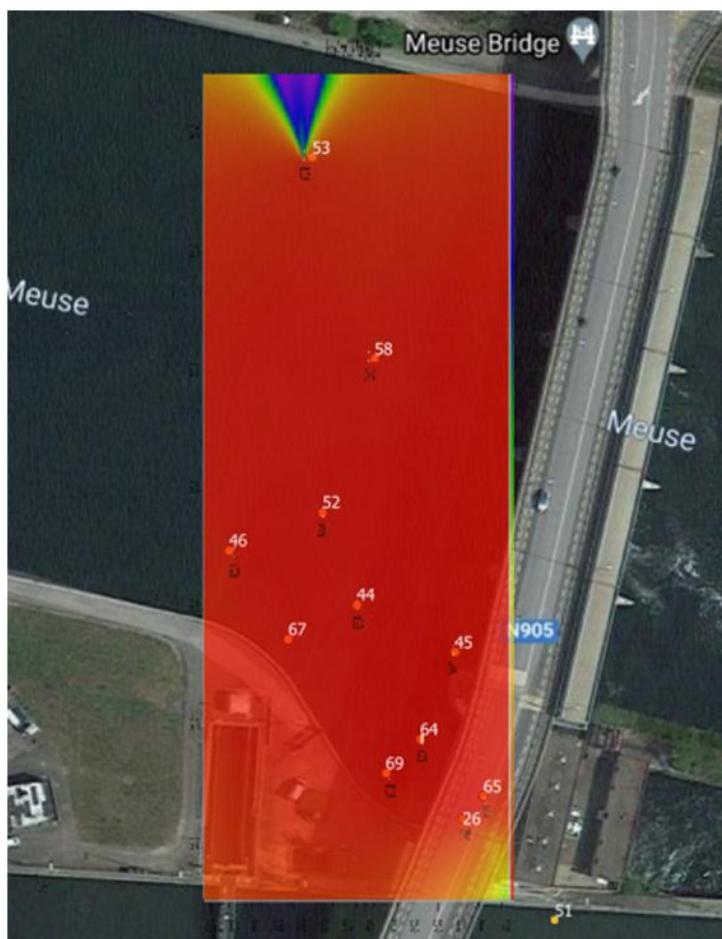


Figure 14 : Répartition théorique de la DOP (Dilution of Precision, sans unité) au sein des réseaux d'hydrophones de Grands-Malades. Echelle des couleurs : 0 (rouge) à > 3 (bleu).

Plus la répartition théorique de la DOP est faible (tend vers le rouge) plus l'acquisition des signaux dans cette zone est meilleure. Les pointes qui tendent vers le bleu peuvent être associées à des « angles morts » du réseau. La couverture acoustique théorique ne prend cependant pas en compte la morphologie du site (forme du canal, profondeur, présence du barrage...) ni les variations hydrologiques (vitesses du courant, températures, salinité...) ni la présence de sources de bruits ambiants (turbines). La couverture acoustique réelle est donc moins précise et l'interprétation des positions calculées doit être mise en perspective avec les conditions théoriques prises en compte par UMAP.

RESULTATS

2.7 Retour d'expérience sur l'aspect matériel

Au cours de ce suivi de printemps 2021 qui s'est étalé du 25/03 au 27/05 (62 jours), 52 hydrophones (LOTEK et ATS) ont été utilisés tout au long de l'étude ou ponctuellement pour certains appareils. 1 Hydrophone LOTEK a été vandalisé (N°50, cordage coupé et appareil disparu) au cours du mois de mai à l'aval de Monsin, un autre appareil a été arraché de son support, probablement par un gros embâcle sur le barrage de Lixhe. 3 hydrophones ont eu des dysfonctionnements systèmes (aucune détection hormis leur propre Beacon) mais qui ont pu être résolus rapidement, ne provoquant qu'une perte de données mineure (Fin mars : 1 hydrophone 2D Grands-Malades, courant Mai : 1 hydrophone aval Ivoz-Ramet et 1 hydrophone aval Lixhe). Le reste du réseau a parfaitement fonctionné tout au long de l'étude. Lors du retrait des hydrophones, l'intervention des plongeurs a été nécessaire pour un appareil dans la prise d'eau, le cordage avait été endommagé par des embâcles. L'état de fonctionnement, durant la période de l'étude, de chaque hydrophone est détaillé en Annexe I.

Le système de capture filet + cage a été opérationnel à partir du 29 Mars pour la réalisation des tests de l'UNamur qui a injecté des smolts directement dans le bypass et le filet afin de mesurer l'impact de ces ouvrages sur les poissons (Action A2). Dès le premier jour des suivis le 31 mars, l'encrassement et le colmatage du bypass et du filet par des déchets et des embâcles de toutes tailles a posé un problème pour la logistique des installations. Le 1^{er} Avril à 09H:00, le filet a été retrouvé éventré par des embâcles propulsés à grande vitesse par le débit important du bypass et la hauteur de chute d'eau (2 à 3m). Les individus utilisés pour l'action A2 ont pu être recapturés avant cette date mais le maintien du système n'a pas été possible pour le reste de l'étude sur l'efficacité du bypass prévu à l'action D2. Le recours à un dispositif de détection RFID a alors été envisagé en urgence pour équiper l'entrée et la sortie du bypass d'antennes de détection automatique, ce qui nécessitait un double marquage (acoustique + RFID) des lots de smolts.

L'encrassement du bypass, qui n'est pas équipé d'un système de dégrillage automatique, a été problématique tout au long du suivi des smolts. Le dégrillage a été réalisé manuellement par les équipes de Profish et Luminus quotidiennement du 20 Avril au 5 Mai (hors week-end) car une quantité importante de déchets s'accumulaient sur la grille, provoquant une perte de débit dans le bypass et obstruant le passage pour les poissons (Figure 15).



Le système de vanne du bypass s'est aussi avéré défectueux à cause d'une mauvaise conception et installation, l'ouverture de la vanne s'effectuait grâce au treuil de l'engin de dégrillage des turbines et la fermeture était réalisée manuellement en poussant la vanne vers le bas à l'aide d'une masse. Cette opération était à la fois longue et peu efficace pour les opérateurs (Profish et Luminus).

Figure 15 : Bypass obstrué par des déchets.

2.8 Présentation des jeux de données

2.8.1 Positionnement 2D des smolts

Sur l'ensemble des positions des smolts calculées par le logiciel sur le site de Grands-Malades, nous n'avons conservé que les positions associées à une DOP inférieure à 1. Les trajectoires de 96 smolts ont ainsi pu être reconstituées à l'approche de la prise d'eau de la centrale. La Figure 13 montre un exemple de trajectoire calculée pour un smolt (ID 64261) s'approchant de la prise d'eau puis de la barrière électrique et enfin du bypass. Le franchissement par le bypass a été confirmé par l'antenne RFID. La plupart des trajectoires obtenues sont cependant peu exploitables, les points de localisation sont parfois séparés de longs intervalles, donnant une fausse impression de trajectoire du poisson alors que quelques points localisés sur un long délai sont justes reliés. Globalement, les données 2D n'ont pas pu être exploitées dans les mesures d'efficacité de la barrière électrique et du bypass dans le cadre du rapport d'efficacité (Sonny et al. 2021).



Figure 16 : Réseau d'hydrophones (points jaune) du réseau 2D à Grands-Malades avec les positions du smolt (ID 64261) calculées par UMAP (points rouge) et sa trajectoire reconstituée (lignes orange).

2.8.2 Données générales non spatialisées

L'ensemble des données traitées dans la base de données permet d'axer les analyses en s'orientant vers une approche par site, une approche par individu ou une approche par hydrophone (ou groupe d'hydrophones). Chaque approche apporte une contribution différente et complémentaire à l'étude. L'analyse globale nécessite d'intégrer plusieurs jeux de données (ID poissons, ID beacons, conditions environnementales, débits turbinés, ouverture des barrages, cycles nyctéméraux...) pour interpréter correctement les données. Le rendu final est constitué par un fichier Excel qui reprend les profils de détection des différents ID sur chaque site instrumenté.

2.8.3 Zones de détection et voies de passage de chaque site

Grâce au retour d'expérience des études précédentes où certains hydrophones captaient des signaux aussi bien sur le barrage que dans la prise d'eau, leurs positions ont été corrigées pour limiter cette superposition autant que possible.

Sur chaque site les hydrophones forment des groupes correspondant aux zones qu'ils couvrent : « Amont », « Barrage », « Turbines », « 2D », « Ecluse », « Aval », etc... et leurs détections sont classées en fonctions de ces groupes. Les dernières minutes de détections d'un individu dans un des groupes d'hydrophones « Barrage » ou « Turbines » permet de déterminer sa voie de franchissement. Sur le site de Grands-Malade, les hydrophones qui composent le réseau 2D ne sont pas pris en compte pour déterminer la voie de passage mais ont été utilisés pour valider des hypothèses comme un non-franchissement. Des franchissements par les écluses ont aussi été identifiés au cours de l'étude.

Pour déterminer une voie de franchissement, nous avons utilisé des filtres standards conçus au cours des précédentes études. Une voie de franchissement est validée si plus de 80% des détections dans la dernière minute sont enregistrées sur les hydrophones d'un des deux groupes « Barrage » ou « Turbines ». Si ce seuil de 80% de détections à 1 minute ne permet pas de trancher, on étend la plage à 2 minutes ou on la restreint à 30 secondes si l'indétermination persiste. Si aucun des 3 filtres ne permet d'atteindre le seuil de 80%, la voie de passage est classée comme « indéterminée ». L'antenne RFID dans le bypass de Grands-Malades a permis de déterminer les franchissements au travers de l'ouvrage car le réseau d'hydrophone ne permet pas de discriminer un passage par les turbines d'un passage par le bypass.

En dernier recours, l'état de fonctionnement du barrage (débits et hauteurs d'eau sur les pertuis), des turbines ou de l'écluse peut alors être utilisé pour qualifier un franchissement : si les turbines sont à l'arrêt au moment du passage, celui-ci est classé « Barrage » et à l'inverse, si le barrage est totalement fermé le passage est classé « Turbines ». Dans le cas où le débit est réparti à la fois sur le barrage et la centrale, l'indétermination ne peut pas être levée.

Les proportions de détections sur l'ensemble du site déterminent la voie de passage, cependant il y a deux possibilités quant à la trajectoire réelle du poisson : le franchissement de l'obstacle ou le retour en amont. Le franchissement de l'obstacle est confirmé par la détection de l'individu sur au moins une station ou un ouvrage aval. Lorsqu'il n'y aucune détection à l'aval du site après une détection sur l'amont, l'hypothèse retenue est celle de l'approche de l'ouvrage sans franchissement, alors que l'absence de détection à l'aval après des détections rendant un passage « barrage » ou « turbines » plausible est associée à un passage avec mortalité. Le franchissement d'un ouvrage causant une mortalité chez les individus est une hypothèse possible pour expliquer l'absence de détection sur des stations avales mais la structure de l'étude ne permet pas de renseigner le devenir d'un individu à proximité immédiate en aval des ouvrages.

2.8.4 Tableau de référence pour les données non spatialisées

En tenant compte de chacun des points vus précédemment, nous avons généré un tableau synthétisant l'ensemble des données des paramètres prioritaires pour chaque poisson sur chaque site. Ce tableau Excel est présenté en Annexe II et comporte :

- L'ID et le lot
- Le nombre de détections total sur le site, la date/heure de la première et dernière détection ainsi que la position de l'hydrophone ayant enregistré ces détections.
- Les données environnementales au moment de la dernière détection (Débit de la Meuse, débit pompé par les centrales, hauteurs d'eau et débit des barrages)
- Le temps de séjour à l'amont du site
- La confirmation de détection en aval et le temps mis pour atteindre cette station
- La voie de passage (Barrage/Centrale/Ecluse/Indéterminée) selon les différents filtres

Ce tableau décrit le parcours des 201 smolts détectés par le réseau d'hydrophones sur les sites de Grands-Malades, Ivoz-Ramet, l'Ourthe et sa confluence, canal Albert, Monsin et Lixhe.

2.9 Conditions environnementales durant l'étude

La principale donnée environnementale observée au cours de l'étude est l'évolution du débit de la Meuse et des débits pompés par les centrales hydroélectriques. Les données de la Meuse proviennent du SPW (Département Expertises Hydraulique et Environnement) qui a des stations de mesures à Amay (station de référence) et Visé. Il fournit aussi les données relatives aux barrages et aux écluses. Les données des débits pompés par les centrales hydroélectriques sont communiquées par Luminus.

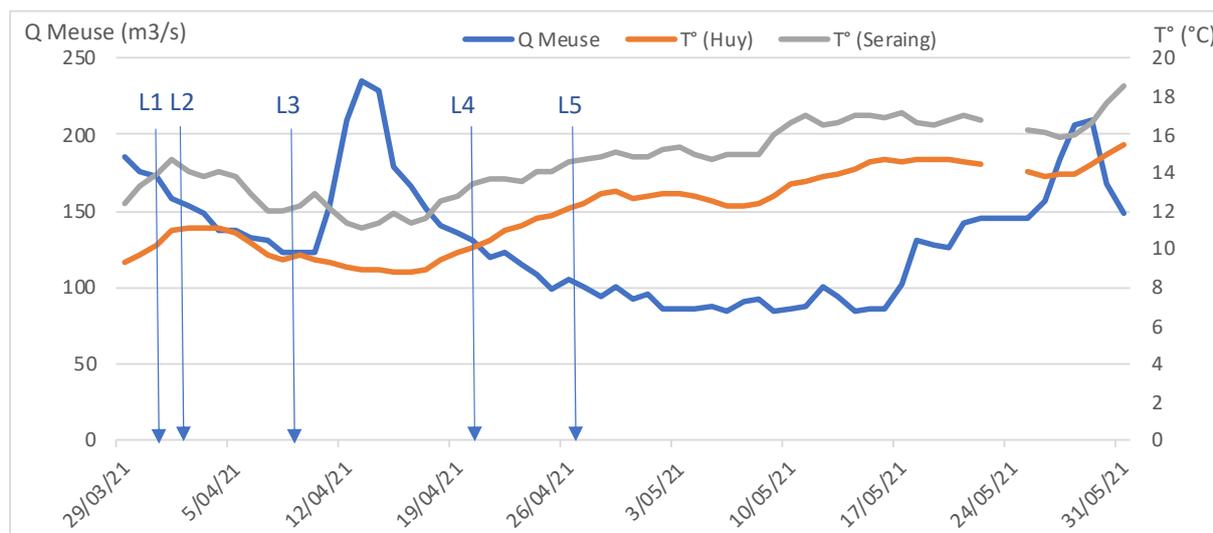


Figure 17 : Débit moyen journalier de la Meuse (Station d'Amay) et température moyenne journalière de la Meuse (station de Huy et de Seraing) sur la période du suivi des smolts. Source : SPW – Département Expertises Hydraulique et Environnement. Centrale Nucléaire de Tihange pour la Température.

Durant la durée de l'étude (Figure 17), le débit était en globalement dans une tendance de descente interrompue par un petit pic de débit autour du 10 avril. Pour le traitement des résultats, les débits mesurés à la station d'Amay sont utilisés pour les sites de Grands-Malade et d'Ivoz-Ramet et de l'Ourthe, les valeurs mesurées à Visé sont utilisées sur les sites de Monsin et de Lixhe.

La température de la Meuse était globalement dans une tendance montante durant la période d'étude, mais les conditions climatiques ont été marquées par une semaine quasiment estivale durant la fin mars (température extérieure > 20°C) suivi d'une semaine avec des précipitations hivernales la semaine suivante.

Pour le site de CH Grands-Malades, référencé par la station de Huy et situé en amont de la Centrale Nucléaire de Tihange, le seuil des 10°C a été franchi une première fois début avril, puis une seconde fois fin avril. Pour les centrales de Ramet, Monsin et Lixhe, référencés par la station de Seraing, on observe les mêmes tendances de température avec un gradient constant d'environ 3°C, soit le réchauffement induit par la centrale nucléaire de Tihange. Le seuil des 10°C a été dépassé constamment dans cette zone.

2.10 Synthèse des franchissements sur chaque site

L'Annexe III présente le graphique de dévalaison de chaque individu suivi, nous décrivons ci-après la répartition des passages sur les différents sites concernés.

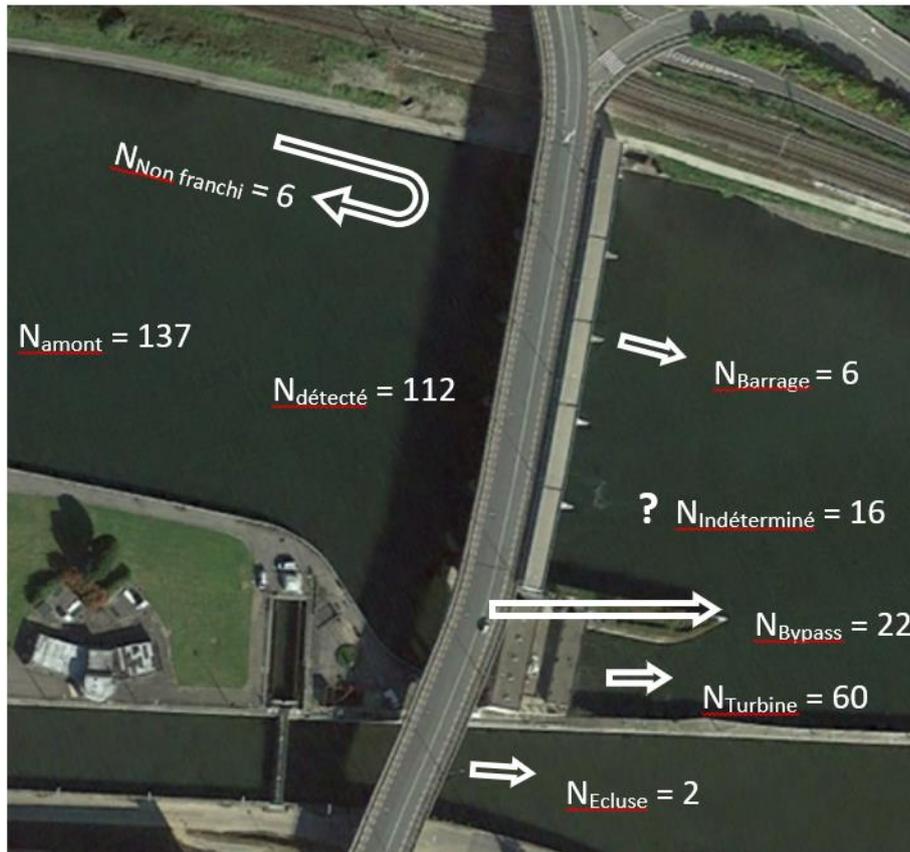
2.10.1 Grands-Malades

137 individus ont été déversés en amont de Grands-Malades répartis en 3 lots (N°1, 4 et 5). 112 smolts (82%) ont été détectés au moins une fois par le réseau amont du site et 100 d'entre eux ont été détectés sur au moins une station aval (89% de réussite de franchissement). 1 smolt du lot 1 été détecté en aval (à Ivoz-Ramet) sans être détecté par le réseau de Grands-Malades, ce qui monte à 113 le nombre de smolts ayant franchi le site.

Le lot 1 a été déversé dans des conditions de bypass opérationnel et de fonctionnement de la barrière électrique. Le lot 4 a été déversé dans ces mêmes conditions alors que pour le lot 5 la barrière électrique était éteinte de manière à étudier l'efficacité du bypass.

Tableau 2 : Répartition des voies de franchissement des smolts sur le site de Grands-Malades. * = Franchissements indéterminés entre ces différentes possibilités.

VOIES DE PASSAGE	N LOT 1	N LOT 2	N LOT 3	N LOT 4	N LOT 5	TOTAL
TURBINE	29	-	-	23	8	60
BARRAGE	3	-	-	1	2	6
BYPASS	0	-	-	5	17	22
ECLUSE	1	-	-	0	1	2
NON FRANCHI	1	-	-	2	3	6
BARRAGE/CENTRALE/BYPASS*	8	-	-	0	0	8
BARRAGE/CENTRALE*	0	-	-	5	2	7
CENTRALE/BYPASS*	1	-	-	0	0	1
TOTAL	43	-	-	36	33	112



En regroupant tous les individus des 3 lots, on observe à la Figure 19 que les smolts ont été détectés en arrivée sur site principalement en fin de journée et début de nuit. Nous avons considéré l'heure d'arrivée et non l'heure de franchissement, étant donné que celle-ci peut être influencée par la recherche d'une voie de franchissement.

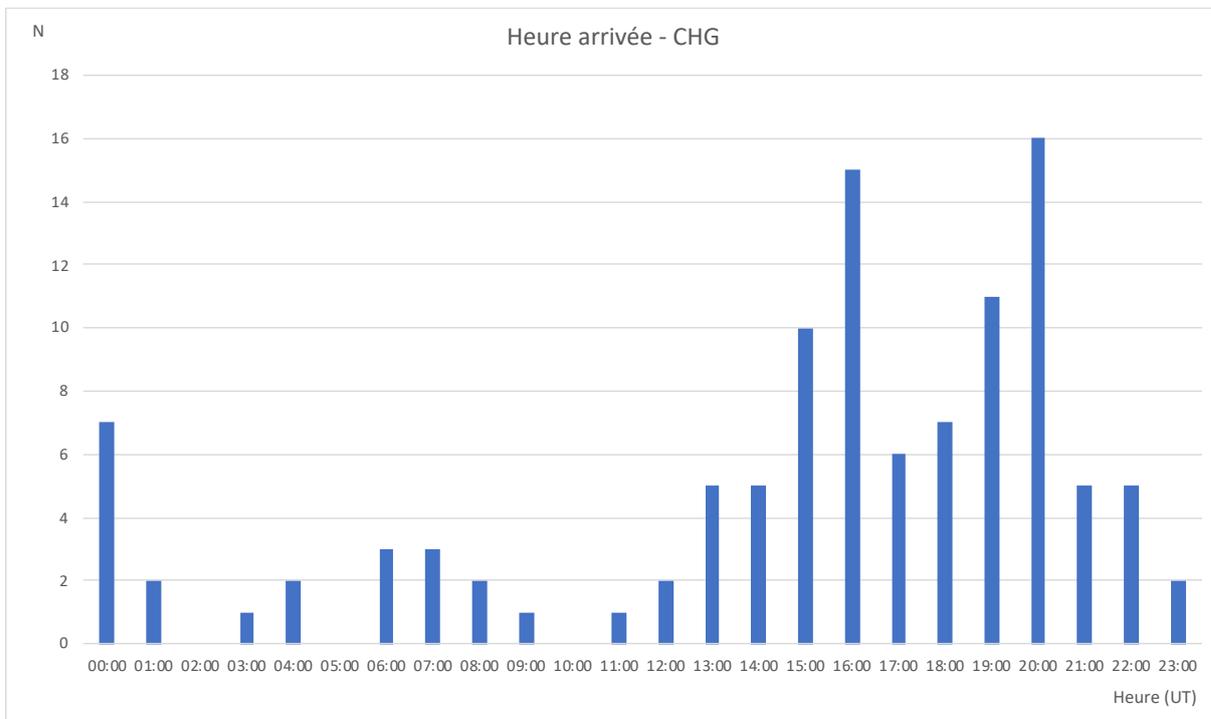


Figure 19 : heure d'arrivée des smolts sur le site de CH Grands-Malades (UT). N = 111.

La Figure 20 présente la répartition de chaque lot.

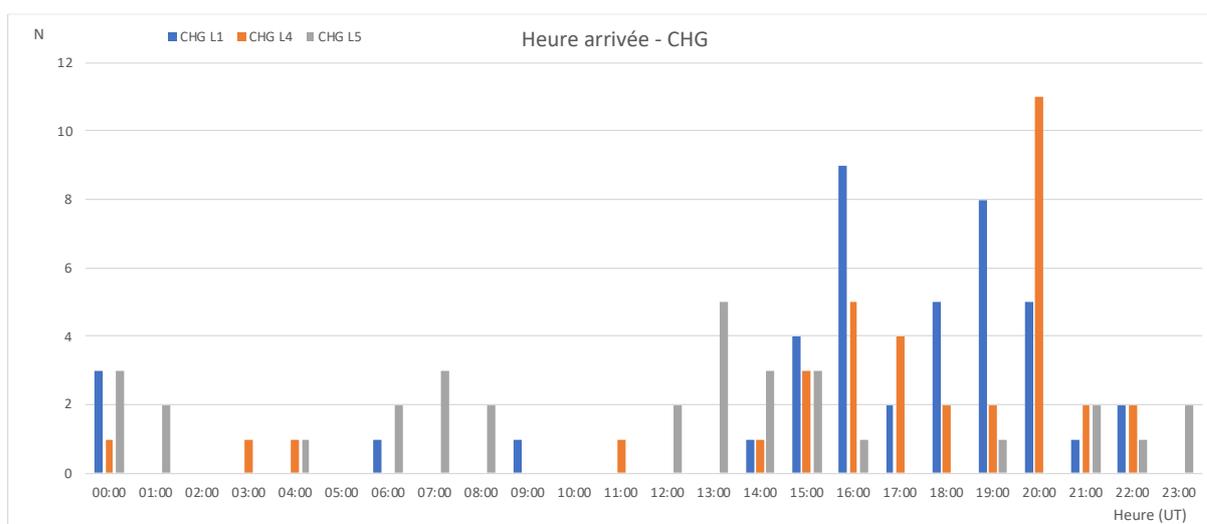


Figure 20 : heure d'arrivée des smolts sur le site de CH Grands-Malades (UT), répartis en lot. N = 111.

Le lot 1, déversé le 31/03 à 11h30 (UT) montre clairement un passage en soirée et début de nuit, essentiellement nocturne donc. Le lot 4, déversé le 20/04 à 11h20 (UT) montre une tendance assez similaire à celle du lot 1, mais avec un pic centré sur une heure plus avancée dans la nuit. Enfin le lot 5, déversé le 27/04 à 09h40 (UT) montre quant à lui des heures d'arrivée plus étalées au cours des 24h.

2.10.2 Ivoz-Ramet

100 smolts ont été déversés en amont d'Ivoz-Ramet, à Engis, réparti en 2 lots (N°2 et 3). Sur les 137 smolts déversés en amont de Grands-Malades, 113 ont effectivement franchi le site. Le nombre total d'individus potentiellement présents à amont du site d'Ivoz-Ramet s'élève donc à 213, tous lots confondus, bien que les poissons issus de Grands-Malades doivent franchir 2 barrages avant d'arriver à Ramet. Sur les 213 smolts, 116 (54%) ont été détectés par le réseau d'hydrophones d'Ivoz-Ramet. Pour les lots 2 et 3, spécifiques à l'étude du site, 97 smolts sur 100 (97%) ont été détectés à proximité de l'ouvrage et 93 (93%) l'ont effectivement franchi.

Pour le déversement du lot 2, une consigne de hauteur d'eau de 90 cm a été demandée au SPW pendant une semaine, alors que pour le lot 3, la consigne demandée était de 50 cm pour une semaine. Au-delà de cette date, le barrage est revenu en fonctionnement normal.

Tableau 3 : Répartition des voies de franchissement des smolts sur le site de d'Ivoz-Ramet.

VOIES DE PASSAGE	N LOT 1	N LOT 2	N LOT 3	N LOT 4	N LOT 5	TOTAL
TURBINE	11	9	15	1	2	38
BARRAGE	12	30	28	0	0	70
NON FRANCHI	0	3	1	1	2	7
ECLUSE	0	0	1	0	0	1
TOTAL	23	42	45	2	4	116

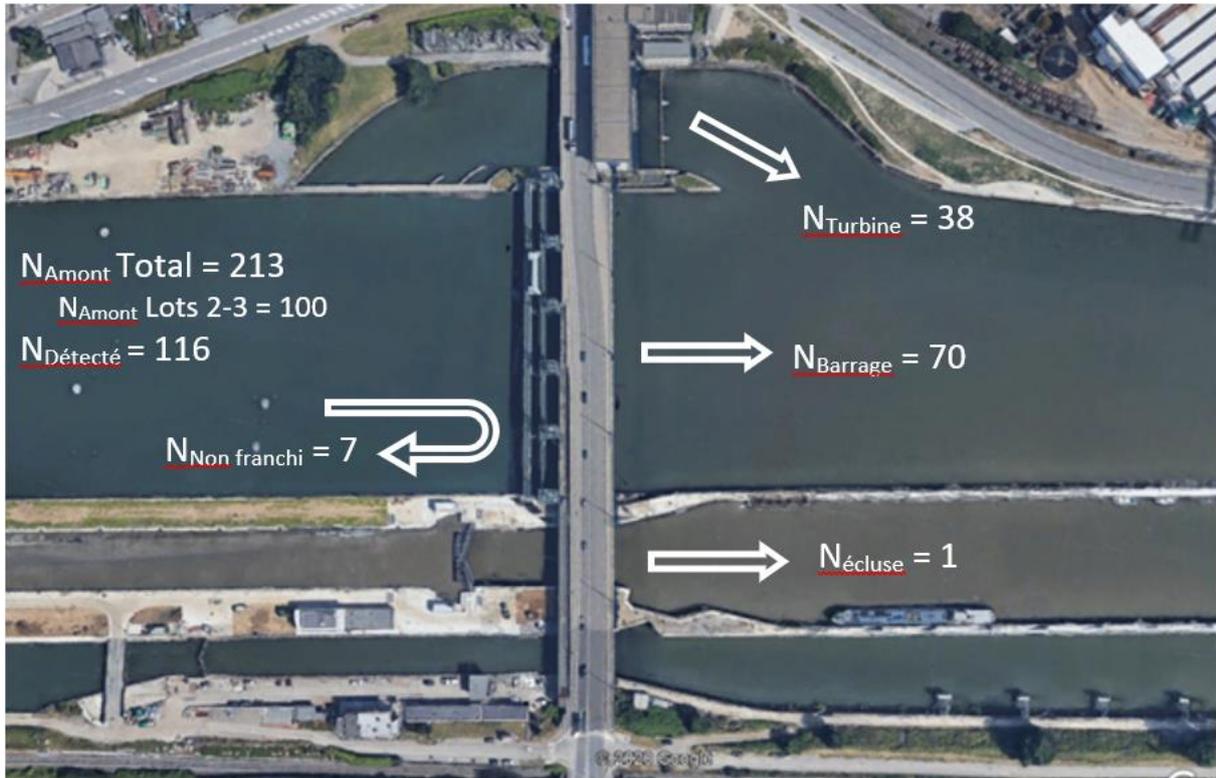


Figure 21 : Vue aérienne de la répartition des voies de passage des smolts sur le site d'Ivoz-Ramet

La Figure 22 présente l'heure d'arrivée de tous les poissons qui se sont présentés à Ramet.

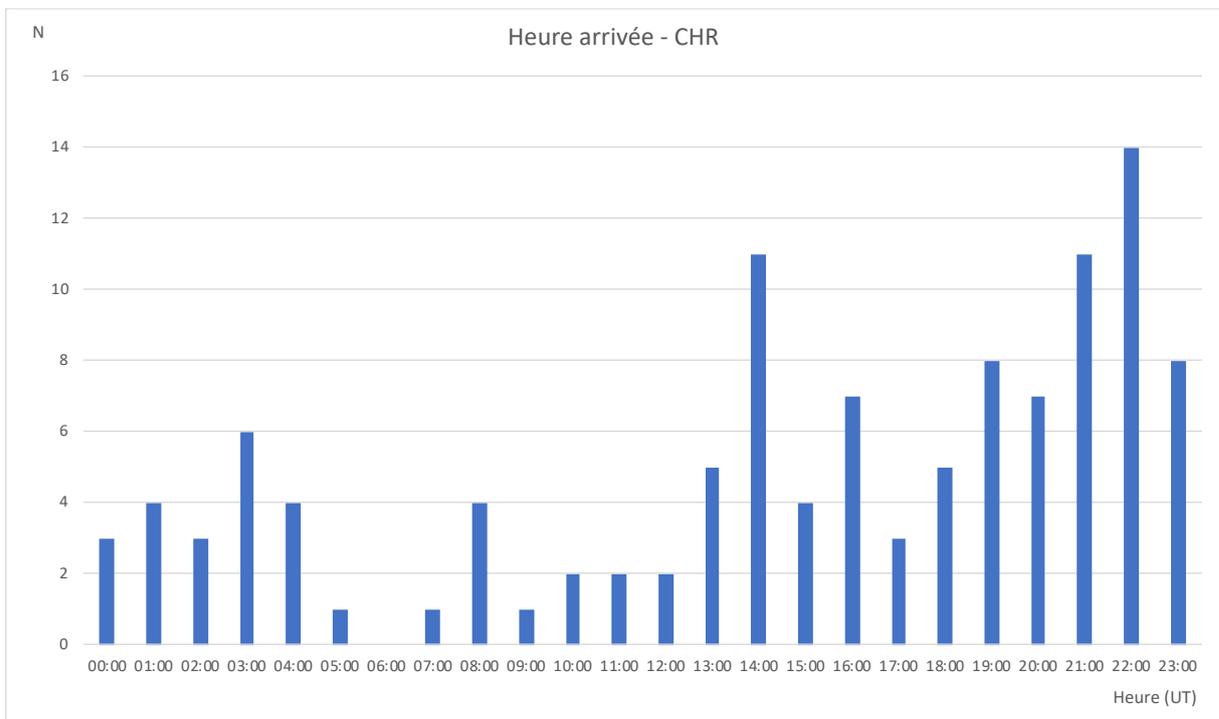


Figure 22 : heure d'arrivée (UT) de tous les smolts détectés en amont de CH Ramet. $N = 116$.

Les smolts se présentent majoritairement en fin d'après-midi et en début de nuit, mais globalement on observe une répartition des poissons quasiment sur l'ensemble du cycle nyctéméral. Ces poissons proviennent soit des 3 lots déversés en amont de CHG, soit des 2 lots déversés en amont de CHR. La Figure 23 ci-dessous présente l'heure d'arrivée des lots 1 (amont de CHG), 2 et 3 (amont CHR), les lots 4 et 5 n'ayant que peu d'individus détectés à CHR.

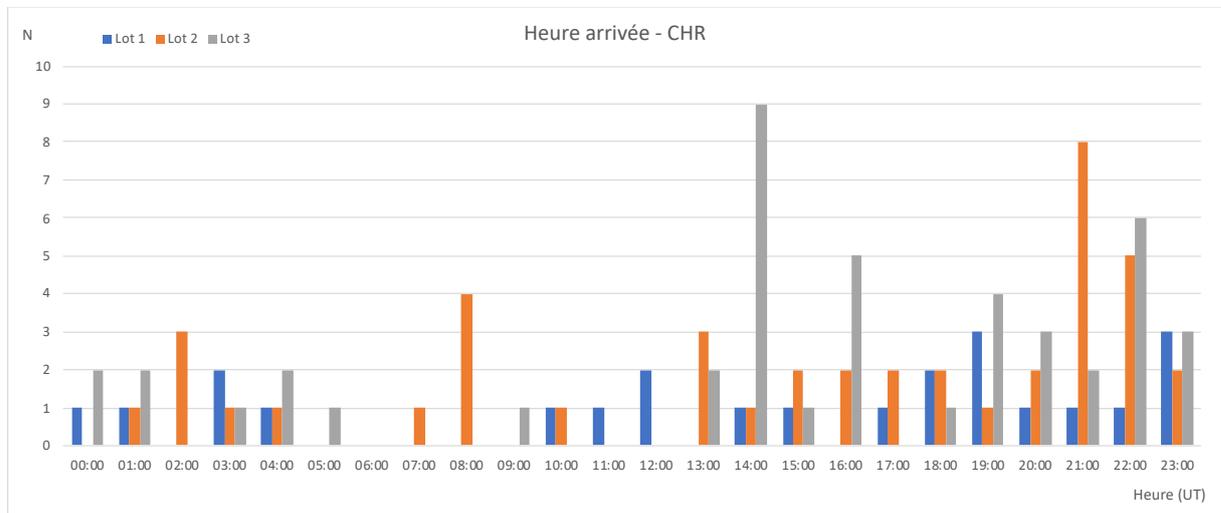


Figure 23 : heure d'arrivée (UT) de tous les smolts détectés en amont de CH Ramet. N = 110.

On observe que le lot 1, qui a parcouru une plus longue distance que les lots 2 et 3 déversés à 4.25 km en amont, présente une répartition journalière assez étalée avec une période plus calme en matinée et plus intense en après-midi et début de nuit. Les lots 2 et 3 ont été relâchés à une semaine d'intervalle à l'amont de CHRamet, et présentent des répartitions contrastées. Le lot 2 montre un pic en début de nuit (21-22h UT) alors que le lot 3 présente un pic à 14h (UT) puis un second pic à 22h (UT). Le lot 2 présente également plus d'activité en matinée que le lot 3.

2.10.3 Ourthe et confluence

Les hydrophones positionnés à l'embouchure de l'Ourthe (Figure 24, Hydrophone N°40) et à la sortie de la dérivation de la Meuse (N°34) apportent une information supplémentaire à l'étude sur les proportions de smolts passant l'Ourthe ou la Meuse, au niveau de la ville de Liège, en provenance du bief aval d'Ivoz-Ramet. 116 smolts sont potentiellement présents dans ce bief, 83 ont été détectés par le réseau (72%). Le tableau 4 résume la répartition des smolts entre ces deux voies de passage.

1 smolt parmi les 83 détectés n'a pas franchi le site, aucune détection de l'individu n'a été faite par l'hydrophone N°34 ni sur aucun site aval.

Tableau 4 : Répartition des voies de franchissement des smolts entre la dérivation et la Meuse.

VOIES DE PASSAGE	N LOT 1	N LOT 2	N LOT 3	N LOT 4	N LOT 5	TOTAL
MEUSE	17	29	28	1	1	76
DERIVATION	1	3	3	0	0	7
TOTAL	18	32	31	1	1	83



Figure 24 : Vue aérienne de la répartition des voies de passage des smolts entre la dérivation et la Meuse. Les points blancs numérotés 34 et 40 représente la position des hydrophones du réseau.

2.10.4 Monsin et Canal Albert

116 smolts étaient présents dans le bief aval d'Ivoz-Ramet, la station intermédiaire de l'Ourthe-Confluence a permis de confirmer la présence de 83 d'entre eux, dont 1 qui n'est pas parvenu jusque Monsin. 27 smolts sur les 115 potentiellement présents sont entrés dans le Canal Albert, 5 en sont ressortis, c'est donc un total de 22 individus (19%) qui ont emprunté cette voie considérée comme sans issue dans la littérature scientifique. Cependant, 1 smolt (ID : BA5E) entré dans le Canal Albert a été redécté au barrage de Lixhe, sans passer par le barrage de Monsin. Cet individu est probablement passé par l'écluse faisant la jonction entre le canal Albert et le bief aval de Monsin, située à 1,8 km de l'entrée du canal. L'impact observé du canal Albert sur la totalité des smolts suivis est au final de 18%

93 individus pouvaient potentiellement se présenter au droit du barrage de l'île de Monsin, 75 y ont été détectés (81%), mais 6 d'entre eux sont remontés définitivement dans le Canal Albert. 69 poissons ont franchi le site, soit 92% des poissons qui s'y sont présentés. 63 individus ont eu une confirmation de franchissement grâce à une détection à une station aval. Les 6 smolts n'ayant pas été redéctés par une station aval ont tous un franchissement présumé par les turbines de la centrale et sont considérés comme mort (8,7%).

Tableau 5 : Répartition des voies de franchissement des smolts entre le Canal Albert et le site de Monsin.

VOIES DE PASSAGE	N LOT 1	N LOT 2	N LOT 3	N LOT 4	N LOT 5	TOTAL
BARRAGE	6	19	9	1	0	35
TURBINE	9	8	17	0	0	34
NON FRANCHI	0	0	0	0	0	0
CANAL ALBERT	6	7	8	0	1	22
TOTAL	21	34	34	1	1	91



Figure 25 : Vue aérienne de la répartition des voies de passage des smolts sur le site de Monsin et du canal Albert

La Figure 26 présente la répartition des heures d'arrivée des 3 lots de poissons les plus détectés sur le site de Monsin.

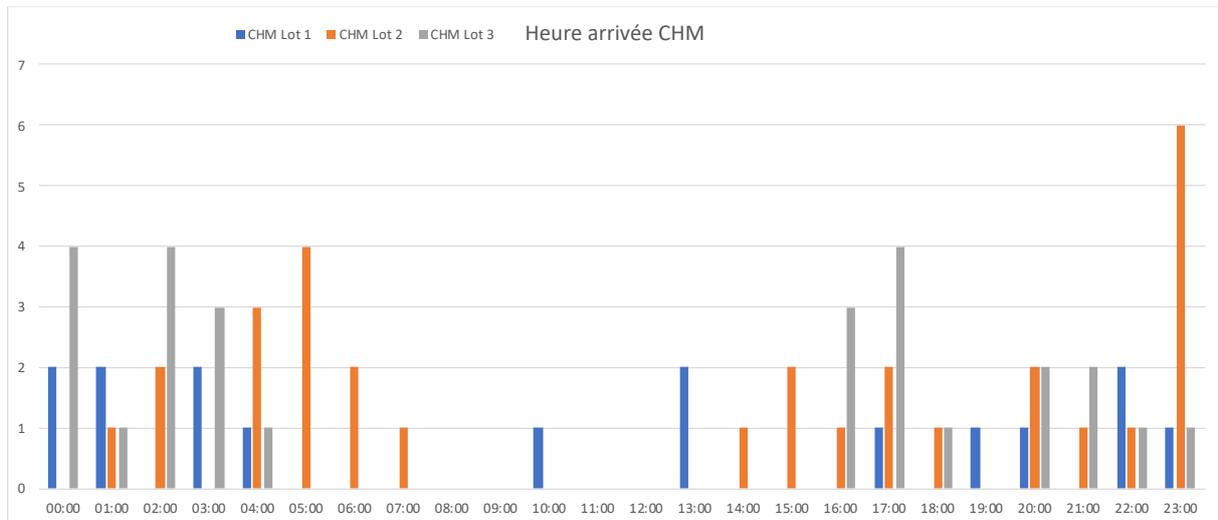


Figure 26 : heure d'arrivée (UT) de tous les smolts détectés en amont de CH Monsin. N = 73.

Les heures d'arrivée du lot 1, en provenance de l'amont de CHG, sont un peu plus étalées dans la journée que pour les lots 2 et 3, en provenance de l'amont de CHR, qui sont plus nocturnes. Ces 3 lots ont été déversés endéans une semaine de délai durant la première semaine d'avril.

2.10.5 Lixhe

Au total, 64 individus étaient présents dans le bief Monsin – Lixhe (63 smolts ayant franchi Monsin et 1 smolt provenant du canal Albert). 59 smolts ont été détectés au barrage de Lixhe (92%) et 57 ont franchi l'ouvrage (96.6%).

Le barrage de Lixhe est le dernier ouvrage sur la Meuse wallonne, il se situe à environ 80km du barrage de Grands-Malades qui est le point de départ des smolts des lots 1, 4 et 5. 15 smolts de ces lots ont atteint le barrage de Lixhe en 11,50 jours en moyenne (Min : 7,93 j ; Max : 17,18 j). Depuis Ivoz-Ramet à 30 km en amont, 44 smolts des lots 2 et 3 sont parvenus jusque Lixhe en $4,75 \pm 2,80$ jours (Min : 1,27 j ; Max : 25,35 j).

Tableau 6 : Répartition des voies de franchissement des smolts entre le Canal Albert et le site de Lixhe

VOIES DE PASSAGE	N LOT 1	N LOT 2	N LOT 3	N LOT 4	N LOT 5	TOTAL
BARRAGE	9	8	11	0	0	28
TURBINE	5	11	13	0	0	29
NON FRANCHI	0	1	0	1	0	2
TOTAL	14	20	24	1	0	59

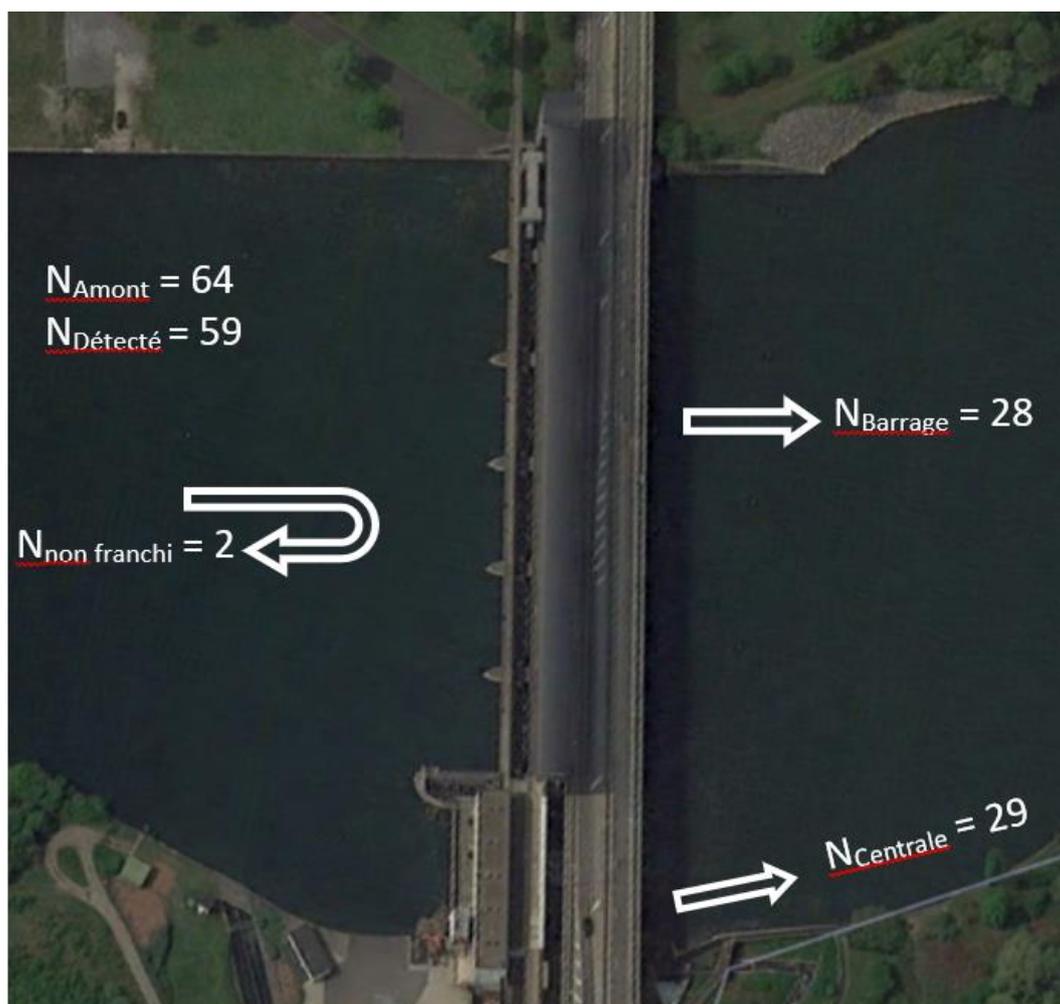


Figure 27 : Vue aérienne de la répartition des voies de passage des smolts sur le site de Lixhe

La Figure 28 présente l'heure d'arrivée des smolts issus des différents lots les plus détectés sur le site de Lixhe.

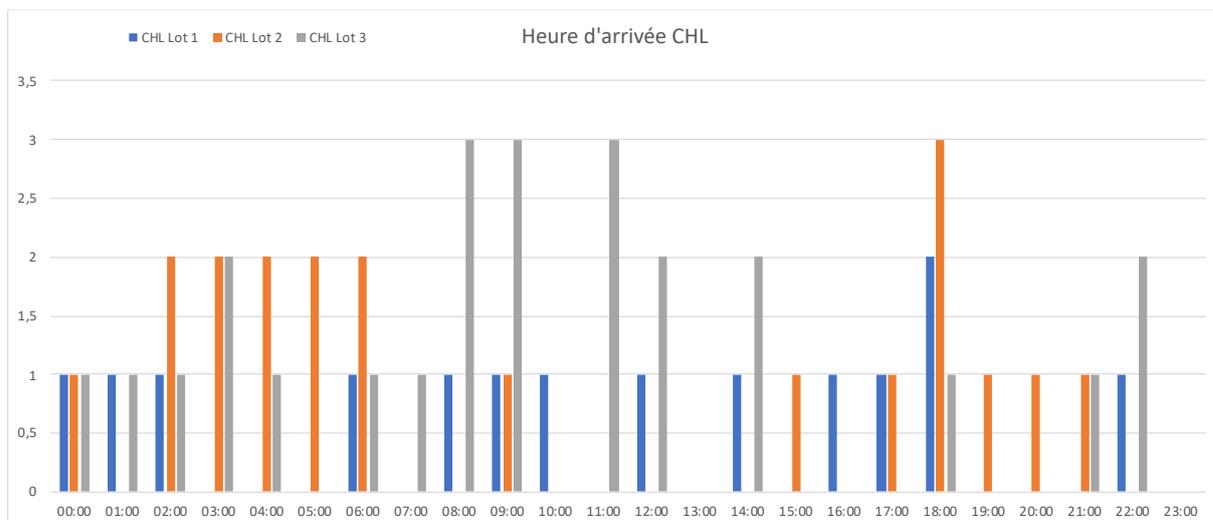


Figure 28 : heure d'arrivée (UT) de tous les smolts détectés en amont de CH Lixhe. N = 59.

On constate sur le site de Lixhe que les 3 lots les plus détectés (lot 1 déversé en amont de CHG, lots 2 et 3 déversés en amont de CHR) présentent des heures d'arrivées assez étalées au cours des heures de la journée et de la nuit. Il est difficile de dégager des tendances parmi les différentes phases d'un cycle de 24h.

2.12 Succès de dévalaison global

Il est intéressant d'exploiter les données pour reconstituer le parcours des smolts appartenant aux différents lots déversés dans différentes conditions de débit et sous des mesures de gestions différentes. Nous abordons d'abord les lots 1, 2 et 3, déversés sous des conditions de débit les plus élevées et avec des lames d'eau maintenues sur un pertuis à CHRamet (90-50 cm de consigne), à CHMonsin (90 cm de consigne) et à CHLixhe (20 cm de consigne) (Figure 29).

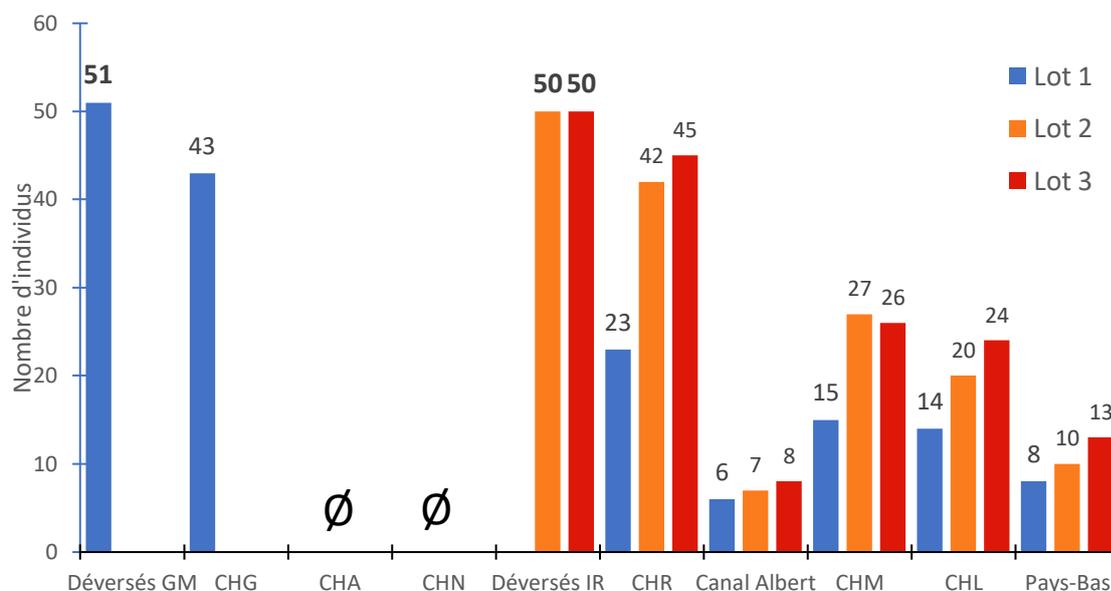


Figure 29 : Évolution du nombre total d'individus des lots 1, 2 et 3 détectés à chaque centrale hydroélectrique depuis leur point de déversement, déversés durant les semaines 13 et 14.

Pour le lot 1, déversé le 31 mars 2021 en amont de CHG sous un débit de l'ordre de 170 m³/s, 14 smolts (27,5%) ont parcouru la plus grande distance jusqu'à Lixhe (90km) en 11,6 jours ± 2,5j. Parmi ces poissons, 8 (15,7%) ont été détectés en aval de Lixhe aux Pays-Bas. Le succès total de dévalaison observé de ce lot est de **15,7%**. Le canal Albert est responsable de 11,8% des pertes.

Pour le lot 2, déversé le 01 avril 2021 en amont de CHR dans un débit de l'ordre de 158 m³/s, le succès total de la dévalaison jusqu'en aval de Lixhe était de **20%**, avec un temps de parcours de 5,6 ± 2,7 jours. Le canal Albert est responsable de 17% des pertes.

Pour le lot 3 déversé le 08 avril 2021 en amont de CHR dans un débit de l'ordre de 123 m³/s, le succès total de la dévalaison jusqu'en aval de Lixhe était de 26%, avec un temps de parcours de 4,0 ± 2,5 jours. Le canal Albert est responsable de 17% des pertes.

Les lots 4 et 5 ont été déversés plus tardivement durant les semaines 16 et 17 en amont de CH Grands-Malades, sous des conditions de déversoirs fermés à CH Ramet, mais des consignes toujours d'application à CH Monsin et CH Lixhe (Figure 30).

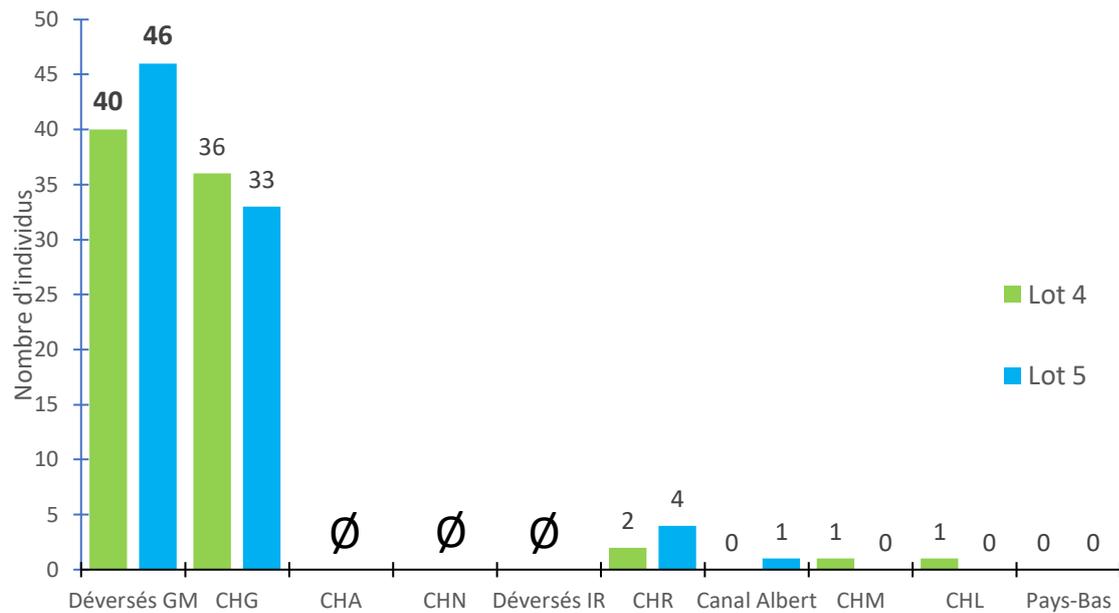


Figure 30 : Évolution du nombre total d'individus des lots 4 et 5 en amont de CH Grands-Malades, détectés à chaque centrale hydroélectrique depuis leur point de déversement durant les semaines 16 et 17.

Le déversement des smolts du lot 4 s'est effectué le 20/04/2021 dans un débit de l'ordre de 131 m³/s, et de 100 m³/s pour le lot 5 le 27/04/2021. Aucun des smolts issus de ces deux lots ont été détectés à l'aval de Lixhe. Seuls **5%** et **8,7%** des smolts des lots 4 et 5 sont parvenus à la centrale d'Ivoz-Ramet depuis leur lieu de déversement en amont de Grands-Malades, alors que 45,1% du lot 1 était parvenu à CHRamet sous des conditions de gestion quasi identiques sur les sites amont. La différence de succès de migration entre le lot 1 et les lots 4 et 5 s'expliquerait principalement par des différences du débit de la Meuse portant la migration, 170 m³/s pour le lot 1 contre respectivement 131 m³/s et 100 m³/s pour les lots 4 et 5. Bien que nous n'ayons pas de données en 2021 sur les sites d'Andenne et Ampsin, il est probable que le plus faible débit rencontré par les smolts des lots 4 et 5 aient conduit à de moins bon franchissement des barrages et des biefs amont, comme observé lors de l'année de référence en 2017.

3 DISCUSSIONS

3.1 *Retour de performance des équipements installés*

Globalement le réseau télémétrique installé a donné une bonne satisfaction. Un hydrophone situé en aval du barrage de Monsin a disparu pendant l'étude, probablement en raison de vandalisme, la zone étant assez fréquentée par des pêcheurs. Cette perte d'hydrophones et des données enregistrées n'a pas porté à conséquence dans le jeu de donnée puisque le principe suivi depuis le début du projet est d'avoir des redondances dans les zones importantes, pour anticiper un dysfonctionnement ou une perte d'hydrophone.

Le système de piégeage mis en place en aval de l'exutoire de CH Grands-Malades a été laborieux à installer mais a finalement été fonctionnel. Il était nécessaire au minimum pour assurer la capture de smolts empruntant le bypass pour vérifier que ce transit n'impactait pas la survie des smolts dans le cadre de l'Action A2. Par ailleurs, des essais de détections de signaux télémétriques acoustiques dans le bypass ont démontré qu'il serait impossible de détecter les smolts passant par le bypass par cette technique. Seul le recours à de la télémétrie RFID, impliquant un double marquage des smolts, pouvait donner satisfaction, mais nous avons décidé dans un premier temps de ne pas y recourir pour éviter d'insérer 2 émetteurs dans les smolts. Le filet était donc également le seul moyen de valider le passage des smolts par le bypass.

Durant les jours qui ont précédés le premier lâcher de smolts, le filet a été en service pendant plusieurs jours pour vérifier sa fiabilité. Malgré de fortes tensions dans les cordages qui tenaient le radeau et la cage de capture en place, il était possible, en ajustant les cordages, de neutraliser les tensions trop fortes et maintenir la cage en équilibre de charge sur ses cordages autour d'une position qu'il fallait cependant réajuster à chaque arrêt ou démarrage d'une turbine de la centrale. La déchirure du filet a été constatée au lendemain du lâcher du premier lot de smolts, et d'une injection directe de smolts dans le bypass et dans le filet, ce qui a permis à l'équipe en charge de l'action A2 d'acquérir les données nécessaires.

En ce qui concerne le suivi du bypass, nous avons donc dû recourir à la télémétrie RFID dans l'urgence, n'ayant pas eu la possibilité d'équiper le bypass plus tôt car celui-ci était encore en travaux quelques semaines avant le lâcher des poissons. Les performances de détection des antennes RFID ont été évaluées rapidement sur le terrain en injectant une trentaine de smolts en amont de l'antenne d'entrée du bypass. Ce test réalisé de manière improvisée n'a pas permis de valider le taux de détection des poissons injectés. Il aurait été utile de procéder à un test plus calibré pour obtenir une plus grande précision. Il en ressort que la détection des smolts par RFID est probablement proche de 100% par au moins une des 2 antennes installées (entrée ou sortie de bypass). Nous avons tenu compte de cela dans nos calculs du taux d'efficacité du bypass, et cette imprécision au pire sous-estime légèrement les performances du bypass mais ne peut pas les surestimer. Nous avons donc obtenu des données valables qui permettent d'évaluer le fonctionnement du bypass selon une approche « conservatrice ».

Le double marquage des smolts avec un émetteur acoustique et une puce RFID représente un lest total de 1.2g pour le poisson ce qui impliquerait de ne pas marquer des poissons d'un poids inférieur à 60g pour respecter la règle des 2% communément admise dans la littérature scientifique. Le poids moyen des smolts ayant reçu un double marquage porte le ratio à 2.5%, avec un maximum à 3.0% pour les plus petits individus double marqués. Bien que la règle des 2% soit une référence partagée par la communauté scientifique, il arrive fréquemment qu'elle soit légèrement outrepassée car impossible à respecter techniquement, comme dans le cas présent. Jepsen et al. 2005 présentent une synthèse de

références dans lesquelles il est démontré que des smolts de saumon pacifique (*Oncorhynchus tshawytscha*) marqué en radio avec des indices de biomasse de 2 à 10% n'ont pas de différence de temps de déplacement et de prédation aviaire sur une dévalaison de 180 km comparativement à des smolts de la même espèce équipés de Pit-tags dont le ratio est < 1%. Ces éléments sont confirmés par une étude plus récente sur des juvéniles de salmonidés qui indiquent que le dépassement de la règle des 2% n'a pas d'incidence ni sur la survie ni sur les capacités de nage, mais qu'il ne faut toutefois pas excéder 7% du poids du poisson (Smircich & Kelly 2014). Nous n'avons pas dépassé 3% du poids du poisson dans notre étude, et nous avons pu également vérifier que le comportement des smolts, 24h après leur marquage, était normal. Nous pensons donc pouvoir exclure ici un effet du double marquage dans l'interprétation des données.

Enfin il est important de noter ici la forte propension au colmatage par les grilles à large espacement du bypass. Bien que notre équipe de terrain, en bonne collaboration avec les exploitants locaux de Luminus, ait assuré un nettoyage quasi quotidien durant le suivi des smolts, le colmatage pouvait impacter jusqu'à presque 50% de la capacité débitante du bypass et également réduire les zones de passages des smolts à travers les débris plaqués sur les grilles. Il n'a pas été possible de quantifier le degré de colmatage au jour le jour, mais durant les phases de nettoyage, nous avons pu observer des smolts en tentative de passage du bypass. Nous pensons que cela a certainement dû jouer dans le franchissement du bypass, sans pour autant déterminer si l'effet sur le franchissement par les smolts était positif ou négatif.

3.2 *Franchissement des ouvrages et succès de migration*

Les données télémétriques ont permis de mettre en évidence les voies de passages des smolts sur les différents sites d'études : CH Grands-Malades, CH Ramet, le Canal Albert, CH Monsin et CH Lixhe.

Les autres sites, CH Andenne et CH Ampsin n'ont pas été instrumentés car non équipé de mesure de solution pilote ciblant les smolts.

A CH Grands-Malades, l'objectif du suivi était de tester l'efficacité de l'exutoire de dévalaison, combiné ou pas avec la barrière électrique. Le taux de détection des lots déversés en amont était de 82%, ce qui correspond à une performance satisfaisante. Les poissons non détectés (N = 25) ont pu subir de la prédation, ou une mortalité différée liée au marquage, où n'étaient pas physiologiquement prêts à dévaler. 89% des poissons ont franchi le site globalement durant le suivi de 2021 où des solutions de franchissement ont été proposées. L'efficacité des solutions testées est décrite dans le livrable de l'action D2 dédié (Sonny et al. 2021).

A CH Ramet, l'objectif était d'étudier l'efficacité d'une lame d'eau maintenue sur le pertuis le plus proche de la centrale, avec une hauteur de lame de 90 cm pour un lot et 50 cm pour le second lot. Le taux de détection des lots déversés à l'amont était de 97%, ce qui est un résultat excellent comparativement à celui observé à Grands-Malades, et qui indique que les smolts utilisés étaient probablement prêts à dévaler vu que la distance depuis le point de déversement était de 4.25 km contre 2.5 km pour les lots amont de Grands-Malades. 93% des smolts ont franchi le site, ce qui démontre une probable efficacité des mesures testées sur le passage des smolts. Les résultats plus précis sont détaillés dans le livrable de l'action D2 dédié (Sonny et al. 2021).

Le Canal Albert a prélevé 22 smolts (19%) sur la population marquée dévalante en Meuse liégeoise. 27 smolts y sont entrés mais 5 en sont ressortis, mais 6 smolts sur les 22 étaient allés au barrage de Monsin en première approche et ont fait demi-tour malgré une lame d'eau de 90 cm maintenue sur le pertuis en rive gauche de la Meuse. Parmi les 22 smolts entrés définitivement dans le Canal Albert, un smolt a été détecté à la CH Lixhe, ce qui implique qu'il ait regagné la Meuse par l'écluse de Monsin. 73% des smolts dévalants semblent donc avoir été en direction du barrage en premier choix contre

37% en direction du Canal Albert. Lors de suivis passés dans la même zone, 54% des premières approches des smolts dans la zone étaient considérées comme des tentatives de passage vers le barrage (Renardy et al. 2021). Les auteurs ont noté que les passages en direction du barrage se faisaient sous un débit Meuse plus élevés que pour les passages en direction du Canal, ce qui indique une influence de la proportion de débit entre les deux voies. Durant notre étude, sur les 93 poissons qui ont été détectés dans la zone Monsin-Canal Albert, 10.7% n'ont pas été détectés à l'aval du site de Monsin, ce qui est une meilleure situation que décrit par Renardy et al. 2021 qui mentionnent 61.4% des smolts qui ne sont pas détectés à l'aval. Le suivi réalisé en 2021 présente des résultats de franchissement bien meilleurs que ceux réalisés précédemment, ce qui tend à suggérer que la mesure de maintien d'une lame d'eau par le barrage a pu avoir un rôle dans le franchissement du site. Il est cependant important de noter que 49% des smolts ont franchi le site par les turbines, voie de passage qui a entraîné une perte de détection de 8.7% à la station aval ou sur le site de Lixhe, alors que 100% des passages par le barrage ont été détectés ou à la station aval, ou sur le site de Lixhe. Cela indique que la voie de passage par la centrale demeure plus pénalisante que le passage par le barrage.

Enfin sur le site de CH Lixhe, 97% des smolts qui se sont présentés à l'amont ont franchi le site, où une lame d'eau de 20 cm était maintenue sur le pertuis le plus proche de la centrale, ce qui semble avoir fait transité 47% des smolts.

Sur l'ensemble du parcours, la présente étude a, pour la première fois, mis en évidence un succès de migration de smolts de saumon atlantique sur l'ensemble de la basse Meuse Wallonne. C'est sur le premier lot déversé le 31 mars 2021, pour lequel toutes les mesures de gestions étaient opérationnelles (barrière électrique ON + bypass à CHG, lame de 90cm à CH Ramet, lame de 90 cm à CH Monsin et lame de 20 cm à Lixhe) que 16% des smolts déversés ont été détectés en aval de Lixhe. Leur vitesse moyenne de déplacement était de l'ordre de 0.09 m/s, ce qui est proche de la vitesse médiane observée dans le tronçon Ourthe-Liège (0.11 m/s, Renardy et al. 2021) ou ailleurs dans la littérature mais le plus souvent sur des distances plus courtes. L'absence de succès de migration jusqu'à l'aval de Lixhe pour les 2 autres lots déversés à l'amont de CH Grands-Malades peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'abord, le débit porteur de la Meuse était plus faible pour ces deux lots (131 et 100 m³/s) que pour le premier lot (170 m³/s). Ensuite, les consignes du maintien d'une lame d'eau n'étaient plus d'application au barrage de Ramet au moment du relâcher des 2 derniers lots, mais elles l'étaient encore au barrage de Monsin.

3.3 *Heure d'arrivée des smolts sur les différents sites*

Les heures d'arrivées des smolts sur les différents sites instrumentés ont été comparées pour chaque lot suffisamment détecté en nombre sur les sites. Nous avons considéré les heures d'arrivée et non les heures de passage, car nous considérons que la première détection sur le site correspond au comportement d'approche naturel du poisson, celui qui serait l'heure de passage en l'absence d'ouvrage. Il est intéressant d'analyser la répartition des passages des sites situés à l'aval direct d'un point de déversement, soit CH Grands-Malades et CH Ramet, des autres sites.

Sur le site de CH Grands-Malades, les smolts se sont présentés en approche du site principalement en début de soirée et début de nuit. Deux pics sont observés, un centré sur 16h (heure légale) et un second sur 20h (heure légale). Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'abord, trois lots ont été déversés en amont de CHG, à des moments différents entre la fin mars et la fin avril. Durant cette période, les jours s'agrandissent assez rapidement et les repères lumineux et thermiques de chaque lot sont donc différents ce qui peut influencer leur cinétique de dévalaison. Ensuite, la proximité du point de déversement, situé à 2.5 km en amont fait que si les poissons se mettent en dévalaison dès leur déversement, l'heure d'arrivée sur le site peut dépendre de l'heure de déversement. Les lots 1 et 4 ont été déversés vers 13h30 (heure légale) alors que le lot 5 a été déversé vers 11h45 (heure légale), soit près de 2h plus tôt.

Sur le site de CH Ramet, la répartition des heures d'arrivée des lots 2 et 3, déversés à l'amont direct durant la première semaine d'avril, est principalement nocturne avec un lot qui présente un pic en début de nuit et l'autre lot un peu plus tard dans la nuit. Le lot 1, déversé à l'amont de CH Grands-Malades, présente quant à lui une répartition plus étalée des heures d'arrivée, avec toujours une prédominance nocturne mais moins importante que sur le site de CH Grands-Malades.

Sur le site de CH Monsin, l'ensemble des 3 lots détectés montre une prédominance d'arrivée en fin d'après-midi et de nuit. A l'inverse, sur le site de CH Lixhe, les arrivées des smolts issus des 3 mêmes lots sont très étalées entre le jour et la nuit, avec même une prédominance diurne pour le lot 3.

Ces observations mettent en évidence des patrons horaires d'arrivée à l'amont des ouvrages qui sont différents sur chaque site, et un possible effet de l'heure et de la distance du point de déversement sur l'heure d'arrivée sur le premier site rencontré. Dans la littérature, on observe souvent une activité de migration journalière centrée sur le crépuscule en début de dévalaison. Dans des expériences similaires en France, 62% à 79% des smolts dévalaient la nuit dans la Nive au niveau de la centrale de Halsou (Larinier & Boyer-Bernard 1991), ou encore 89% des smolts franchissaient de nuit le barrage de Pointis sur la Garonne (Croze et Larinier 1999). Enfin, plus récemment et localement, le suivi de smolts marqués de Pit-tags au niveau de l'exutoire de Lorcé (Amblève) en 2012 et 2013 indique que les périodes de détection assimilées à des tentatives de franchissement se passent principalement entre 21h et 05h, avec un pic entre 21h et 00h00 (Benitez et al. 2013).

Cependant, il semble que des patrons de migration diurnes apparaissent au fur et à mesure que la température de la rivière augmente. Ces observations ont été rapportées entre-autres sur le suivi des smolts sur le site de Poutès (Lemaire 2015). Le patron journalier de dévalaison s'expliquerait par une évolution de la rhéotaxie, positive avec dérive passive au débit de la migration, négative avec nage active en fin de migration avec un seuil à 12°C également observé dans une rivière anglaise (Ibbotson et al. 2006). Enfin, dans cette même rivière, le nombre de migrants diurne semble même majoritaire lorsque la température dépasse 13,6°C (Thorpe et al. 1994). L'effet de la température semble jouer sur une augmentation de la proportion de rhodopsine dans la rétine des poissons à plus haute température qui facilite l'activité diurne. Une migration majoritairement nocturne à basse température permet par ailleurs un meilleur échappement aux prédateurs quand les capacités de nage (et de réponse d'évitement) des poissons sont plus limitées. C'est aussi pour cette raison que dans beaucoup de rivières on observe une taille moyenne plus petite des smolts en migration nocturne qu'en migration diurne (Ibbotson et al. 2011).

L'apport de 3°C induit par la centrale nucléaire de Tihange pourrait expliquer un possible changement de comportement des smolts lors de leur migration. Selon l'hypothèse que l'augmentation de la température est un signal qui accroît la tendance diurne, les passages sur les centrales de Ramet, Monsin et Lixhe ont eu lieu sous des conditions de températures supérieures.

Cette spécificité thermique de la Meuse est à prendre en compte dans les mesures de protection des smolts au niveau des centrales, notamment pour le passage préférentiel par une lame de barrage maintenue ouverte. Alors qu'il pourrait être possible de réaliser une ouverture de vanne préférentielle de manière nocturne, le régime thermique altéré de la Meuse rend cette option quasi impossible sur les sites situés en aval de la Centrale Nucléaire de Tihange, étant donné le possible effet sur le rythme journalier de la migration plus diurne que sur les sites amont. Il faut cependant remarquer que l'essentiel des smolts en dévalaison naturelle dans la Meuse proviennent de l'Ourthe, plus froide, et donc que le profil journalier naturel de migration pourrait être différent que celui observé ici. Dans leur suivis récents, Renardy et al. 2021 notent qu'environ 30% des smolts sont détectés en approche de Monsin en journée.



4 BIBLIOGRAPHIE

Benitez, J.P. ; Dierckx, A. ; Brédart, D. ; Grandry, L. ; Hanzen, C. & Ovidio, M. 2013. Caractérisation des comportements de dévalaison et de montaison de poissons migrateurs en vue d'une optimisation et d'une conception des dispositifs de franchissement sur deux sites hydroélectriques de l'Amblève. 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. Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie de l'Université de Liège, 214 pages.

Croze, O. & Larinier, M. 1999. Étude du comportement de smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) au niveau de l'usine hydroélectrique de Pointis sur la Garonne et estimation de la dévalaison au niveau du barrage de Rodère. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* **353-354** : 141-156.

Epicum, S. et al. 2019. Action A3 : Modelling of the passage through hydraulic works in order to design the solutions. Deliverable : Numerical and physical hydraulic models of the pilot sites + design of the fish passages (Actions C1&C2) 83pp.

Ibbotson, A.T. ; Beaumont, W.R.C. ; Pinder, A. ; Welton, S. & Ladle, M. 2006. Diel migration patterns of Atlantic salmon smolts with particular reference to the absence of crepuscular migration. *Ecol. Freshw. Fish* **15** : 544-551.

Ibbotson, A.T. ; Beaumont, W.R. & Pinder, A.C. 2011. A size-dependent migration strategy in Atlantic salmon smolts : small smolts favour nocturnal migration. *Environ. Biol. Fish.* DOI 10.1007/s10641-011-9824-0.

Jepsen, N.; Schreck, C.; Clements, S. & Thorstad, E.B. 2005. A brief discussion on the 2% tag/body mass rule of thumb. In Spedicato, M.T.; Lembo, G.; Marmulla, G. (eds). Aquatic telemetry : advances and applications. Proceedings of the 5th conference on Fish Telemetry held in Europe. Ustica, Italy, 9-13 June 2003. Rome, FAO/COISPA. 2005, 295 p.

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.

Lemaire, M. 2015. Etude du comportement des smolts de saumons atlantique (*Salmo salar*) au droit de la retenue de Poutès (Allier) à l'aide de la télémétrie 2D. Mémoire de Fin d'Études – AGRO CAMPUS OUEST – CFR Rennes ; 68pp.

Lerquet, M. ; Beguin, J. ; Colson, D. & Sonny, D. 2020. Rapport de suivi télémétrique des anguilles argentées durant la phase de test pilote de mesures de protection sur les sites hydroélectriques de Luminus. Rapport Milestone, Action D2, 64 pp.

Murillo Calvo, A. & Leyssens, L. 2021. Installation of a downstream pipe at the Grands-Malades site : report of the construction of a downstream migration fish path. C1 deliverable report, LIFE4FISH, 17pp.

Renardy, S.; Abderrahmane, T.; Benitez, J.P. ; Dierckx, A.; Bayens, R.; Coeck, J.; Pauwels, I.S.; Mouton, A.; Archambeau, P.; Dewals, B.; Pirotton, M.; Epicum S. & Ovidio, M. 2021. Trying to choose the less bad route : Individual migratory behaviour of Atlantic salmon smolts (*Salmo salar* L.) approaching a bifurcation between a hydropower station and a navigation canal. *Ecological Engineering* 169 : 106304. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106304>



Roy, R. ; Beguin, J. & Sonny, D. 2017. Tests de la télémétrie acoustique VEMCO (69&180 KHz) et LOTEK 416.7 KHz sur le site de Grands-Malades. Rapport interne à Luminus, 35pp.

Roy, R. ; Beguin, J. ; Watthez, Q.; Goffaux, D. & Sonny, D.; 2018. Suivi des smolts de saumon atlantique en migration au niveau du tronçon de la Meuse exploité par 6 centrales hydroélectriques. Rapport à Luminus, 81 pp.

Smircich, M.G. & Kelly, J.T. 2014. Extending the 2% rule : the effect of heavy internal tags on stress physiology, swimming performances, and growth in brook trout. **Anim. Biotelemetry** **2**, 16, <https://doi.org/10.1186/2050-3385-2-16>.

Sonny, D. ; Watthez, Q. ; Goffaux, D.; Beguin, J. & Roy, R. 2018. Suivi des anguilles argentées en migration au niveau du tronçon de la Meuse exploité par 6 centrales hydroélectriques. Rapport à Luminus, 68 pp.

Sonny, D. ; Beguin, J. & Lerquet, M. 2020. Monitoring of the effectiveness of the pilot solutions – Part I : silver eels. LIFE4FISH deliverable report Action D2, 27 pp.

Sonny, D. ; Beguin, J. & Lerquet, M. 2021. Monitoring of the effectiveness of the pilot solutions – Part II : salmon smolts. LIFE4FISH deliverable report Action D2, 29 pp.

Teichert, N.; Tétard, S. & De Oliveira, E. 2019. Definition of hydropower management rules based on a downstream migration model – adaptation of an existing model to the Lower Meuse conditions. A4 Deliverable Report, LIFE4FISH, 20 pp.

Teichert, N.. Benitez, J.P.; Dierckx, A.; Tétard, S.; de Oliveira, E. ; Trancart, T. ; Feunteun, E. & Ovidio, M. 2020. Development of an accurate model to predict the phenology of Atlantic salmon smolt migration. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems* **30** : 1552-1565.

Thorpe, J.E. ; Metcalfe, N.B. & Fraser, N.H.C. 1994. Temperature dependence of switch between nocturnal and diurnal smolt migration in Atlantic salmon. In : MacKinlay, D.D., ed. High Performance Fish. International Fish Physiology Symposium. Vancouver : Fish Physiology Association, Mackinley Don D., ED. Pp 83-86.