



LIFE4FISH



LIFE4FISH

# RAPPORT DE SUIVI TELEMETRIQUE DES ANGUILLES ARGENTÉES 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. ; Beguin, J. ; Colson, D. & Sonny, D.

---

RAPPORT MILESTONE

V1.0

29/07/2020

---



## TABLE DES MATIERES

<b>1 INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2 MATÉRIEL ET MÉTHODES</b>	<b>5</b>
2.1 DESCRIPTION DU MATÉRIEL	5
2.2 TESTS DE PORTÉE DE DÉTECTION	5
2.3 INFLUENCE DES BARRIÈRES RÉPULSIVES SUR LA PORTÉE DE DÉTECTION	9
2.4 TESTS DU MAPPING 2D	12
2.5 IMPLANTATION DU RÉSEAU D'HYDROPHONES	15
2.6 CAPTURE ET MARQUAGE DES ANGUILLES	22
2.7 TÉLÉCHARGEMENT DES DONNÉES DES HYDROPHONES	24
2.8 TRAITEMENT DES DONNÉES NON SPATIALISÉES	25
2.9 TRAITEMENT DES DONNÉES SPATIALISÉES	26
2.10 ANALYSES STATISTIQUES	28
<b>3 RÉSULTATS</b>	<b>29</b>
3.1 RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR L'ASPECT MATÉRIEL	29
3.2 PRÉSENTATION DES JEUX DE DONNÉES	30
3.3 DONNÉES GÉNÉRALES NON SPATIALISÉES	31
3.4 CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DURANT L'ÉTUDE	33
3.5 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS SUR CHAQUE SITE	34
3.6 CAPACITÉ MIGRATOIRE SUR L'AXE DE MIGRATION	40
3.7 DERNIÈRES VOIES DE FRANCHISSEMENT AVANT LA DISPARITION DU POISSON	44
3.8 TEMPS DE PROGRESSION ET VITESSE DE NAGE ENTRE LES SITES	51
3.9 RÉPARTITION NYCTHÉMÉRALE DES FRANCHISSEMENTS	53
3.10 OBSERVATIONS COMPORTEMENTALES PAR LES DONNÉES SPATIALISÉES (2D)	57
<b>4 DISCUSSION</b>	<b>59</b>
4.1 DURÉE DE VIE DES ÉQUIPEMENTS ET FIABILITÉ DES DONNÉES	59
4.2 CINÉTIQUE DE DÉVALAISON OBSERVÉE	60
4.3 FACTEURS INFLUENÇANT LE SUCCÈS DE MIGRATION LE LONG DU PARCOURS ÉTUDIÉ	60
4.4 CYCLE NYCTHÉMÉRAL DES FRANCHISSEMENTS	61
<b>5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>62</b>
<b>6 BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>63</b>



## **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 – DNF - Service de la Pêche pour l'autorisation de déversement d'anguilles sauvages en provenance du Rhin dans la Meuse.



## 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 réduire la mortalité des anguilles argentées et des smolts de saumon atlantique. Ce suivi se réalise par télémétrie, et consiste à observer les comportements d'approche et de franchissement des anguilles argentées et des smolts de saumon atlantique au droit des ouvrages ciblés au moyen de la télémétrie acoustique.

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 ce rapport (Sonny et al. 2018).

Le présent suivi vise à mesurer selon la même technique l'évolution de la proportion d'anguilles qui empruntent les différentes voies de franchissement (centrale, barrage, écluse) en présence d'une mesure de gestion mise en œuvre sur les sites pilotes : barrière électrique à CH Grands-Malades, arrêts de turbinage pilotés par un modèle de dévalaison à CH Andenne, barrière à bulles à CH Lixhe.

Dans le présent rapport, seules les données relatives aux voies de franchissement et à la cinétique de dévalaison sont abordées. Ce rapport servira de référence pour la rédaction du livrable de l'action D2 intitulé « suivi de l'efficacité des mesures pilotes de gestion ». C'est dans le présent rapport que les aspects techniques du suivi sont abordés, alors que le livrable sur l'efficacité des mesures de gestion prendra les résultats traités dans le présent rapport comme donnée de base.

## 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 (Sonny & Roy 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 paquet 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 anguilles 2019-2020 a été réalisé. Les émetteurs utilisés étaient de la série L-AMT-14-12, de 14 x 45 mm et 8 g, avec une fréquence d'émission moyenne d'une pulse toute les 3 secondes pour une durée de vie de près de 400 jours.

### 2.2 Tests de portée de détection

En 2017, le réseau télémétrique avait été déployé rapidement après les premiers tests de performance et nous n'avions pas eu l'opportunité de vérifier la portée effective des hydrophones déployés sur site autrement que lors de l'étude concrète. Nous avons alors observé que les portées de détection étaient visiblement plus importantes que lors de nos tests préliminaires, ce qui parfois a induit une superposition des portées d'hydrophones qui couvraient à la fois une partie de la prise d'eau et une partie du barrage. Les données du premier suivi ont donc apporté, sur la majorité des sites, une proportion importante de voies de passages qu'il nous était impossible de déterminer.

Il est donc apparu, avant le nouveau suivi prévu, de poursuivre les tests de portées de détection dans l'optique d'essayer d'améliorer la connaissance des portées, et espérer réduire le nombre de voies de franchissement indéterminées dans le présent suivi.

#### 2.2.1 Portée nominale en Meuse

Les hydrophones WHS4250 (LOTEK) utilisés dans le cadre de cette étude ont une portée de détection des émetteurs variable en fonction des conditions environnementales et hydrologiques du milieu dans lequel ils se situent. La portée nominale est ici définie comme la distance à laquelle un hydrophone peut détecter 50% des émissions d'un signal acoustique dans la Meuse sans structures ou ouvrages à proximité (parois en bétons, turbines, forts courants...) pouvant provoquer des interférences. Le test de portée nominal a été réalisé dans le bief amont d'Andenne le 30/04/2019 à un débit d'environ 116 m<sup>3</sup>/s (mesure à la station d'Amay), en plaçant un émetteur (fréquence = 25 émissions / min) à une distance de plus en plus éloignée de l'hydrophone. La Figure 1 montre l'évolution du nombre de détections de l'émetteur (tag) par minute enregistrée par l'hydrophone au cours du temps.

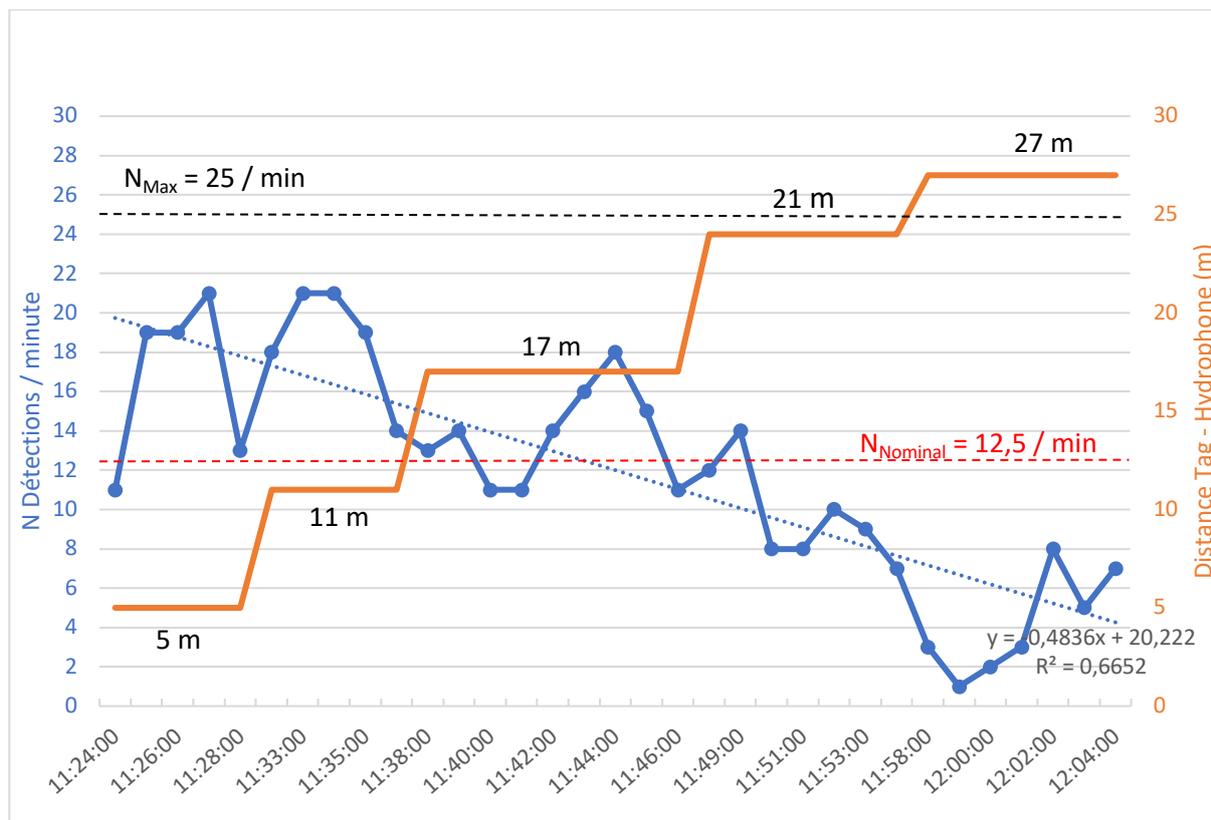


Figure 1: Évolution du nombre de détections/min (bleu) de l'émetteur par l'hydrophone par rapport à la distance Tag/hydrophone (orange) au cours du temps et dans des conditions nominales de fonctionnement.

La courbe de tendance qui décrit l'évolution du nombre de détection par minute en fonction de la distance entre le tag et l'hydrophone montre qu'à 17m l'appareil est capable d'entendre 50% des signaux émis par le tag. Cependant, malgré l'absence de source évidente de perturbations dans la zone de test, on remarque une variabilité ( $R^2 = 0,67$ ) dans la qualité du signal pouvant être imputée aux caractéristiques environnementales et hydrologiques du milieu et accentué par la courte durée d'écoute (5 minutes par points fixes).

### 2.2.2 Portée dans une prise d'eau

Les études précédentes ont mis en évidence l'influence importante des turbines hydroélectriques et des structures en béton sur le bon fonctionnement des hydrophones placés à proximité. La Figure 2 montre un test de portée réalisé dans la prise d'eau d'Andenne avec un hydrophone positionné à 10m des grilles de protection des turbines. L'émetteur utilisé avait une fréquence d'émission de 25/min.

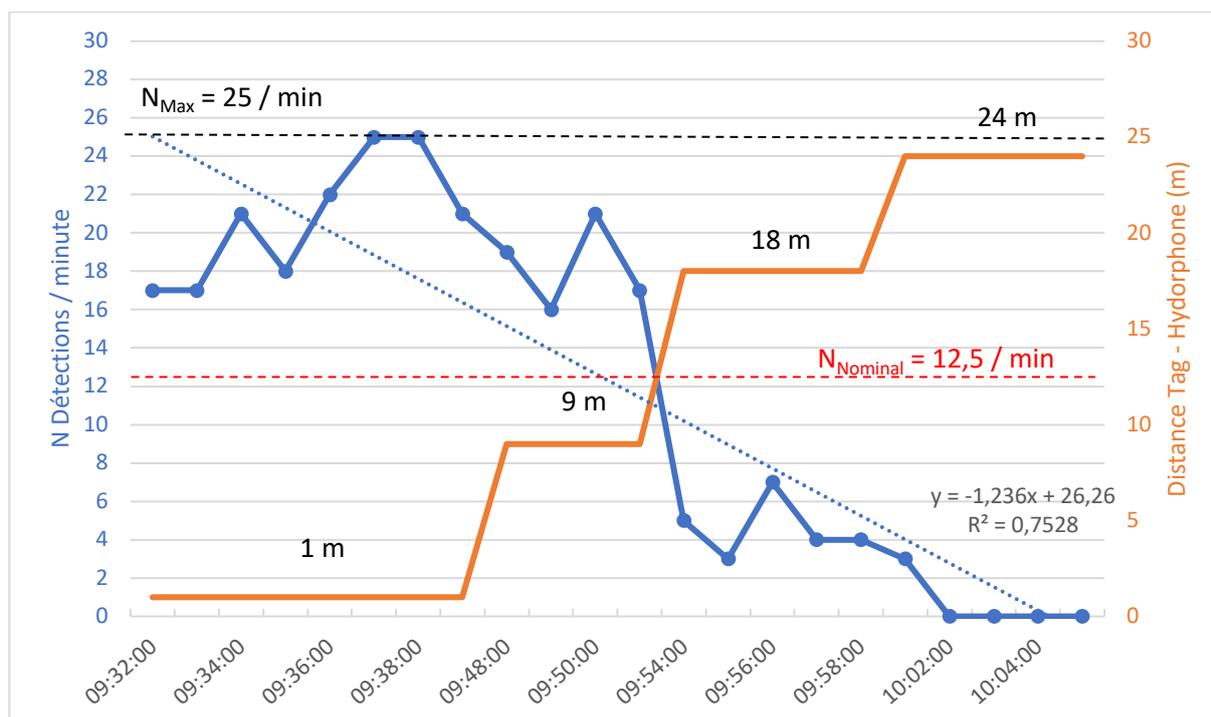


Figure 2 : Évolution du nombre de détections/min (bleu) du Tag par l'hydrophone dans une prise d'eau de centrale hydroélectrique par rapport à la distance Tag/hydrophone (orange) au cours du temps. \*Moy = moyenne des détections/min  $\pm$  Ecart-type sur la période de test.

La distance maximale à laquelle l'hydrophone a détecté l'émetteur est de 18m, la courbe de tendance montre un fonctionnement nominal (50% des signaux captés) à 9m. Cependant, à cette distance, l'hydrophone capte 73% des signaux émis contre 18% à 18m. La valeur de la portée nominale est légèrement sous estimée ici par la régression linéaire.

On remarque une diminution des capacités d'écoutes de l'hydrophone dans une prise d'eau comparé au fonctionnement dans un bief. Ces résultats justifient l'installation d'au moins 2 hydrophones sur les rives pour couvrir la totalité d'une prise d'eau dont la section est supérieure à 20m.

### 2.2.3 Portée dans une écluse

Les principales caractéristiques d'une écluse pouvant impacter le bon fonctionnement d'un hydrophone sont : la proximité des navires (bruit de fond), la proximité des murs en bétons (réverbération du signal), les structures métalliques (portes et échelles) et les variations du niveau d'eau... Toutes ces contraintes limitent fortement l'utilisation des hydrophones à l'intérieur des écluses, c'est pourquoi il a été privilégié de positionner les appareils à proximité de la sortie aval des écluses lorsque la situation le permet.

La Figure 3 et la Figure 4 montrent respectivement les différentes implantations des tags et de l'hydrophone dans l'écluse d'Andenne pendant le test et les résultats de portée obtenus.

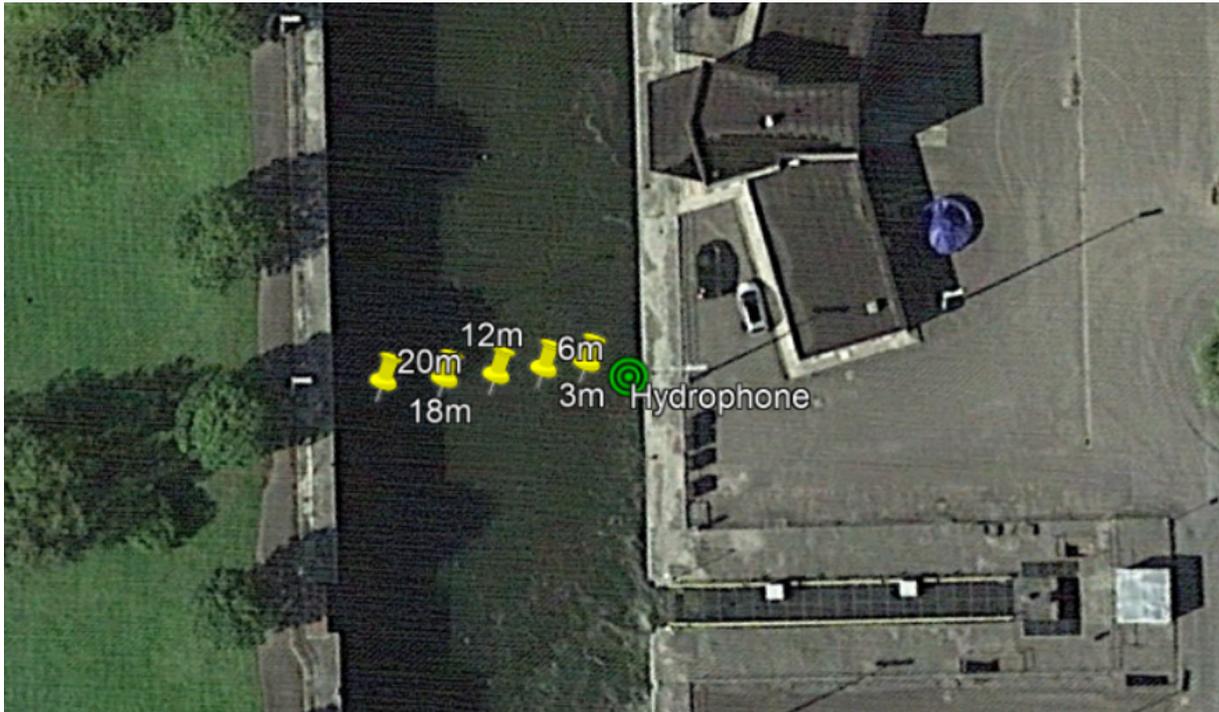


Figure 3 : Positions successives du tag (jaune) et de l'hydrophone (vert) lors du test de portée de détection dans l'écluse d'Andenne.

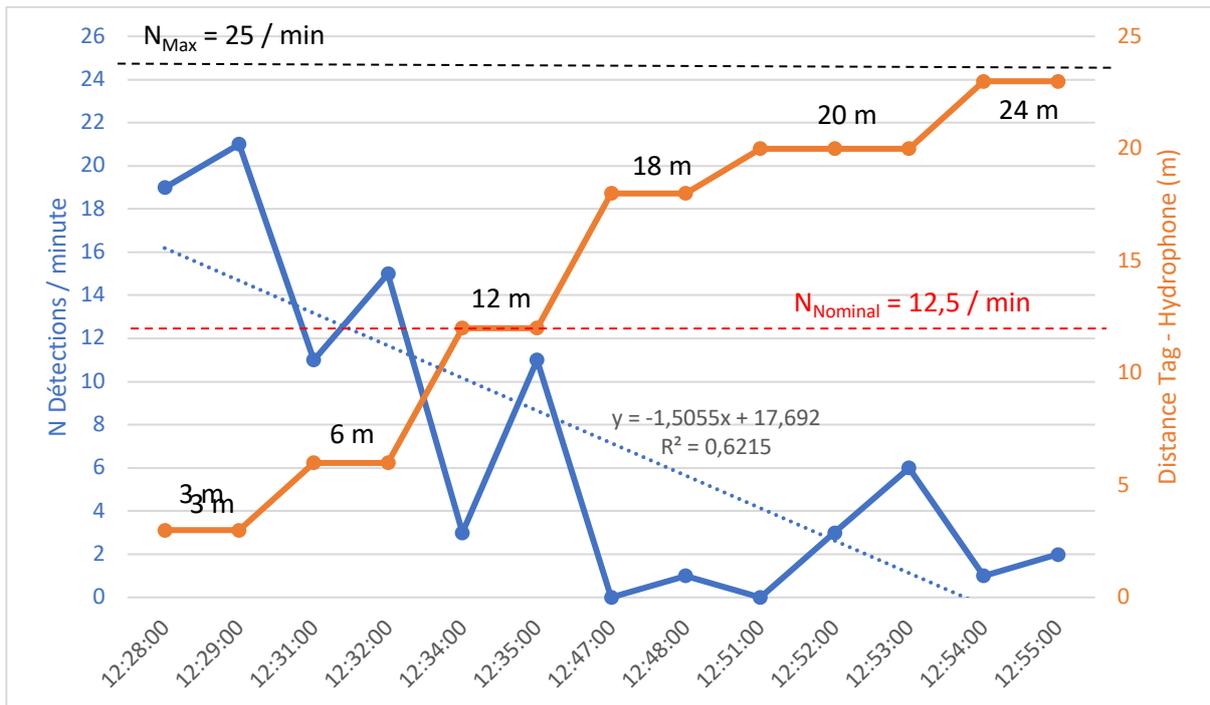


Figure 4 : Évolution du nombre de détections/min (bleu) du Tag par l'hydrophone dans l'écluse d'Andenne par rapport à la distance Tag/hydrophone (orange) au cours du temps.

À proximité immédiate de l'émetteur (3m), l'hydrophone détecte 66% des émissions et < 10% après 12m (milieu de l'écluse). L'hydrophone capte 50% des signaux émis par le tag à 6m. Pour couvrir la totalité de la largeur de l'écluse, 2 hydrophones seraient nécessaires. Pour les raisons évoquées plus haut et le risque supplémentaire de collision entre navires et hydrophone, et comme le nombre d'hydrophones disponibles pour couvrir les écluses était limité, il a été décidé de placer un unique hydrophone en sortie d'écluse pour couvrir cette voie de passage sans risquer de

détériorer le matériel. Enfin, on sait du suivi de 2017 que cette voie de passage n'est que sporadiquement empruntée par les anguilles.

## 2.3 Influence des barrières répulsives sur la portée de détection

### 2.3.1 Barrière électrique

Une barrière comportementale a été installée dans la prise d'eau par la société Procom System le 19/08/2019, dans le cadre du projet LIFE4FISH avec pour objectif une diminution du passage des poissons au travers des turbines. La barrière est composée de 2 rangées de tiges métalliques immergées verticalement, espacées d'environ 1,20m entre-elles, dans lesquelles passe un courant électrique et génère un champ électromagnétique répulsif pour les poissons.

Lors de sa mise en fonction, un test a été réalisé pour déterminer l'influence de l'ouvrage sur le réseau acoustique (Figure 5). 4 hydrophones ont été positionnés de part et d'autre de la barrière pour former un réseau capable d'enregistrer les signaux d'un émetteur acoustique se trouvant à proximité de la barrière électrique (Fréquence d'émission : 25 signaux/min). Le débit de la Meuse était d'environ 56 m<sup>3</sup>/s et la centrale captée environ 40 m<sup>3</sup>/s pendant la durée du test.

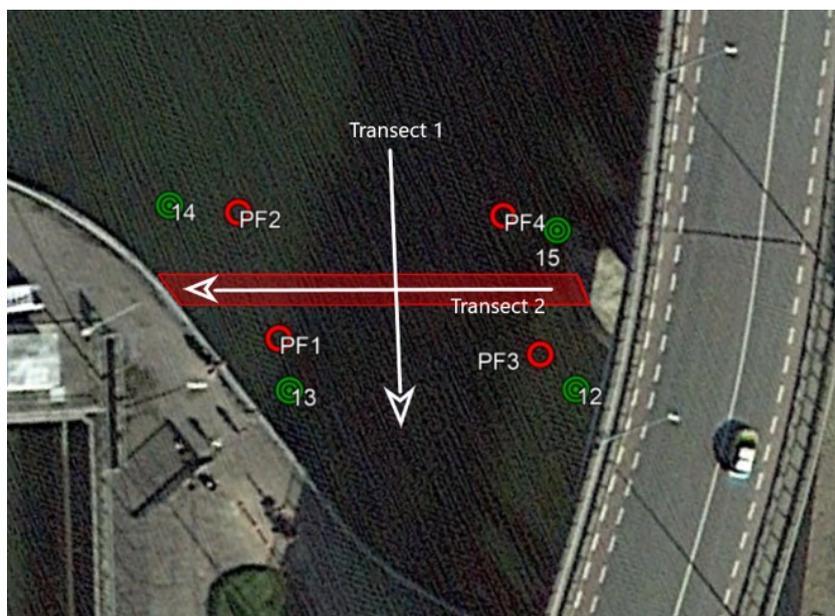


Figure 5 : Schéma du test d'influence de la barrière électrique implantée à Grands-Malades sur le réseau acoustique. Zone Rouge : Barrière électrique - Cercles Rouges : Position de l'émetteur lors des Points Fixes - Cercles Verts : Position des hydrophones pendant toute la durée du test - Flèches Blanches : taille et direction des transects réalisés avec l'émetteur

La Figure 6 présente les résultats obtenus pour les 4 positions d'émetteur fixes (PF) et les 2 transects réalisés au travers de la barrière en fonctionnement.

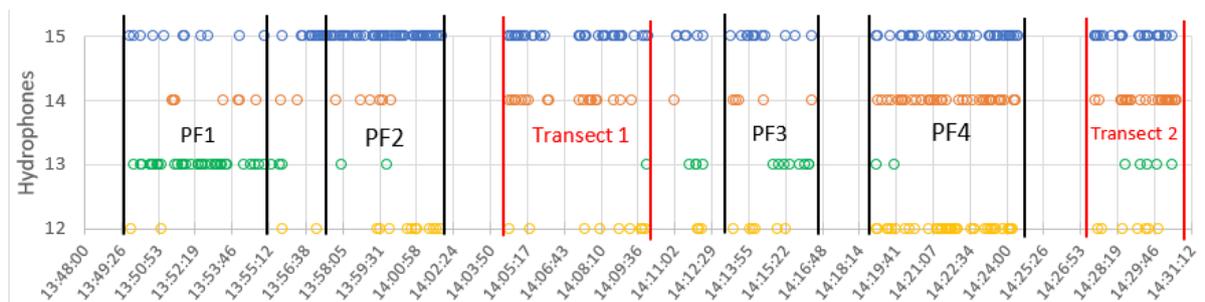


Figure 6 : Nombre de détections de l'émetteur par les 4 hydrophones positionnés autour de la prise d'eau au cours du temps.

Sur ce graphique de la Figure 6, chaque cercle représente 1 détection de l'émetteur par un hydrophone (N°12, 13, 14 ou 15) au cours du temps. Les intervalles (Points Fixes « PF » et transects) représentent les périodes durant lesquelles ont été effectuées les différents tests.

Les résultats montrent qu'au cours de tous les tests, des détections sont enregistrées par au moins 3 des 4 hydrophones du réseau. La première conclusion est que la barrière ne fait pas écran aux signaux acoustiques qui la traversent.

En termes de portées de détection, les hydrophones à l'extérieurs de la prise d'eau ont capté des signaux clairs lorsque le tag était situé à environ 30m : 12 détections/min pour l'hydrophone N°15 lors de PF2 et 7,5 détections/min pour le N°14 lors de PF4.

En termes de qualité du signal (densité de détection durant le test), on remarque une diminution lorsque le signal doit traverser la barrière : lors de PF1, le tag est situé à l'intérieur de la prise d'eau, les hydrophones à l'extérieur (N°14 et 15) ont capté un signal sporadique. Pendant le transect 1, une coupure du signal est détectée lorsque l'émetteur franchi la barrière (14:06:43), mais les faibles portées observées dans ce milieu peuvent aussi expliquer cette coupure de signal. Pour le transect 2, l'émetteur évolue alors dans la barrière, la qualité des détections reste correcte en fonction du déplacement de la tag au cours du temps.

De ces observations, il semble donc que la barrière électrique n'impacte pas significativement les portées déjà faibles de détection des hydrophones installés à proximité.

### 2.3.2 Barrière à bulles

Une barrière comportementale a été installée par les plongeurs d'Hydroscaph en face de la prise d'eau de la centrale hydroélectrique d'Ivoz-Ramet. Elle crée un rideau de bulles sur toute la hauteur de la colonne d'eau et a pour objectif d'obstruer le passage des poissons vers les turbines.

Le 18/09/2019, un test a été réalisé pour déterminer l'influence de l'ouvrage sur le réseau acoustique. 2 hydrophones ont été positionnés de part et d'autre du rideau de bulles (Figure 7), un émetteur (25 signaux/minute) a été déplacé sur 4 points différents pour déterminer à chacun de ces points, la capacité d'écoute des hydrophones. Le débit de la Meuse était très faible lors de la réalisation du test (12m<sup>3</sup>/s), la centrale hydroélectrique captait la totalité du débit. Le rideau de bulles était alors vertical, en cas de débits plus importants, le rideau est aspiré vers les turbines et son sommet arrive au niveau du voile de béton qui protège la prise d'eau de la centrale des débris flottants.



Figure 7 : Disposition des hydrophones (en vert) et des émetteurs acoustiques (en rouge) de part et d'autre de la barre à bulles (en jaune) devant la prise d'eau de la centrale hydroélectrique d'Ivoz-Ramet.

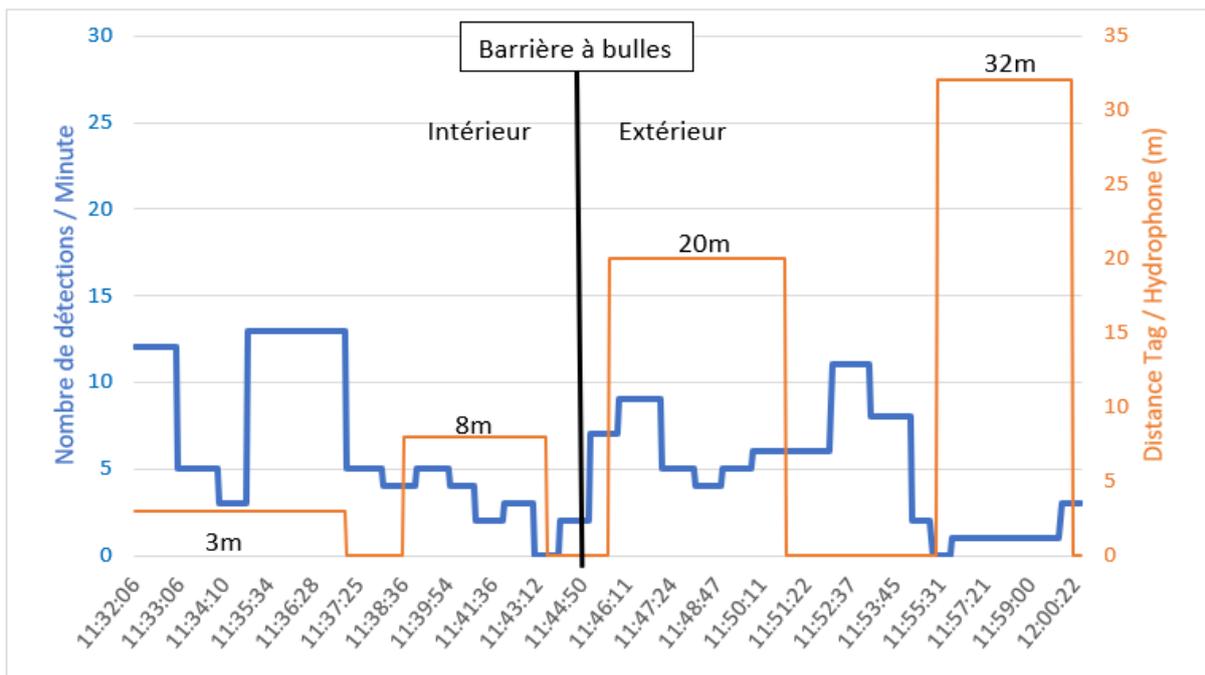


Figure 8 : Évolution du nombre de détections par minutes de l'émetteur par l'hydrophone N°54 à l'intérieur de la barrière à bulles.

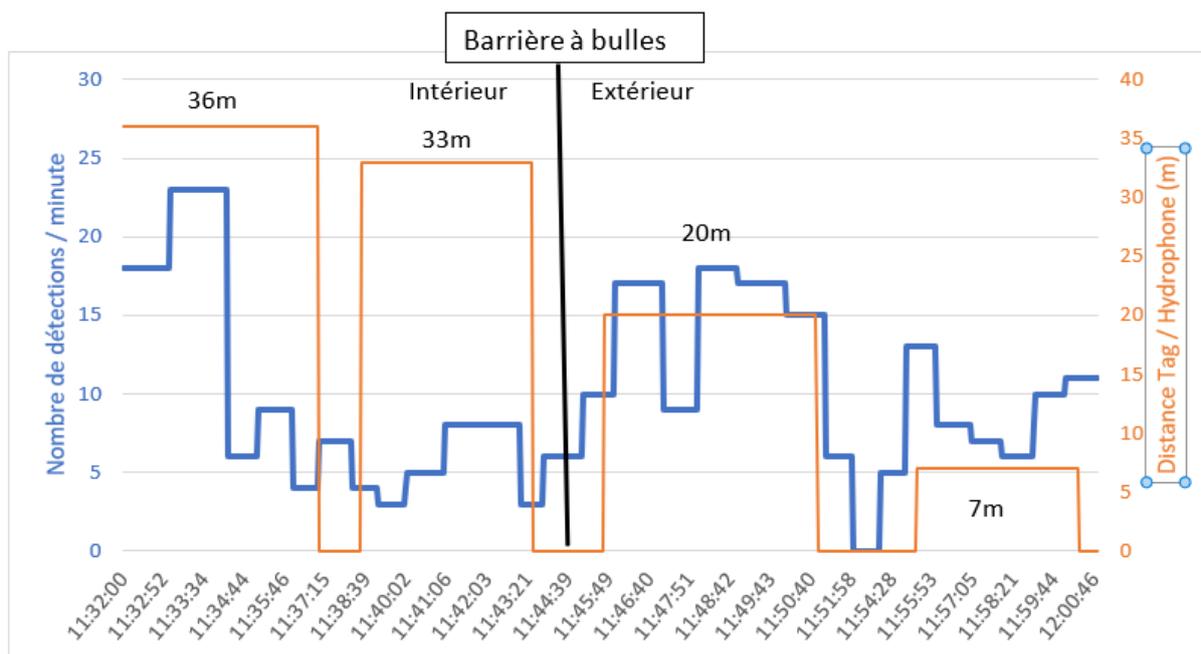


Figure 9 : Évolution du nombre de détections par minutes de l'émetteur par l'hydrophone N°52 à l'extérieur de la barrière à bulles.

La Figure 8 et la Figure 9 montrent que la barrière à bulle n'empêche pas les signaux acoustiques de se propager au travers car les hydrophones captent des émissions de part et d'autre du rideau de bulles. Cependant, la capacité d'écoute des hydrophones semble limitée lorsque l'émetteur est à proximité immédiate des bulles. Dans la configuration étudiée, la barrière ne semble pas impacter significativement la propagation du signal, mais par prudence, le réseau 2D sera majoritairement installé à l'extérieur de la barrière à bulles.

## 2.4 Tests du mapping 2D

Grâce au logiciel U-MAP de LOTEK, les données recueillies par un réseau dense d'hydrophones (modèle : WHS 4250) peuvent être exploitées pour retracer le trajet emprunté par un émetteur acoustique et donc visualiser en 2D le comportement d'un poisson au sein du réseau.

Le test de mapping 2D du réseau d'hydrophones de Grands-Malades a été réalisé le 20/08/2019 avec un réseau de 6 appareils, la barrière électrique n'était pas encore installée à cette date (Figure 10). Le test consistait à faire évoluer un émetteur acoustique immergé à 2m de profondeur dans le réseau d'hydrophones, les trajectoires empruntées sont enregistrées grâce à un GPS (précision :  $\pm 2m$ ) et permettent de comparer les résultats du logiciel aux données du terrain.

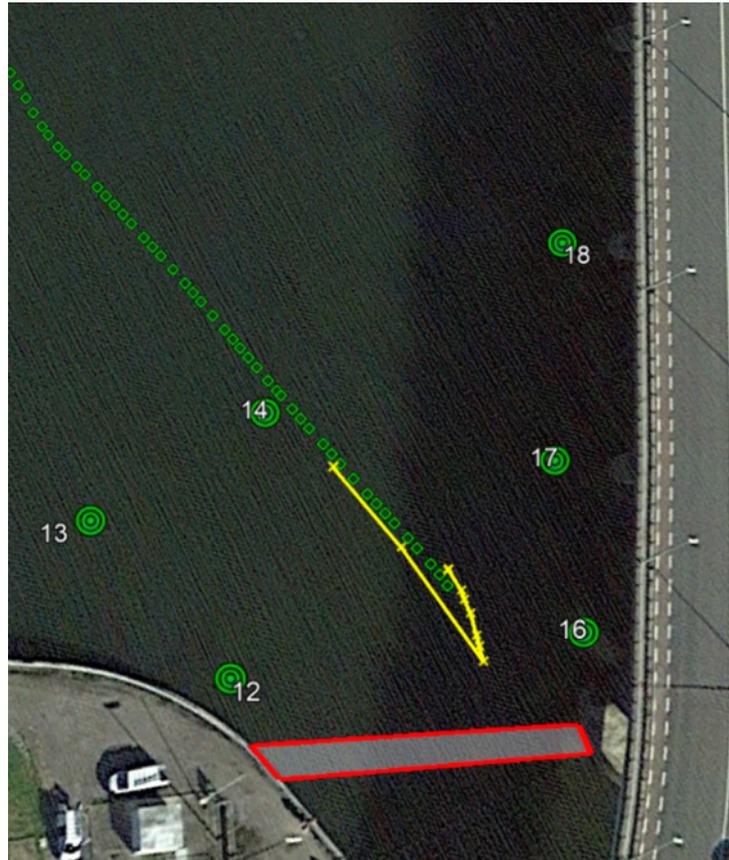


Figure 10 : Positions des hydrophones (ronds verts numérotés) installés devant la prise d'eau de Grands-Malades pour le test de télémétrie 2D. En rouge, la position de la barrière électrique. Les carrés verts représentent la trajectoire de l'émetteur enregistrée par GPS et en jaune la trajectoire de l'émetteur calculée par U-MAP.

Sur la Figure 10 les cercles verts numérotés correspondent à l'emplacement des hydrophones et le polygone rouge à la position future de la barrière électrique. Le tracé en vert correspond au trajet de l'émetteur (de haut en bas) enregistré par GPS sur le terrain, malheureusement à proximité du pont, le GPS perd systématiquement le signal et la fin de la trajectoire, décrivant un demi-tour à l'approche de la barrière, n'a pas pu être enregistrée. Le tracé jaune représente le trajet 2D calculé par U-MAP grâce aux données des hydrophones, on peut y voir l'entrée de l'émetteur dans le réseau ainsi que le demi-tour réalisé par le bateau mais non capté par le GPS.

Le tracé GPS et la reconstitution coïncident assez bien, un léger décalage semble observé, il peut également être dû au décalage de la couche GoogleEarth. Si l'on mesure le décalage dans l'espace entre les points GPS et les points reconstitués en 2D synchronisés (N=2), la précision est de  $\pm 3,21\text{m}$ .

La Figure 11 est le résultat du second test de mapping 2D avec un émetteur en mouvement. Le tracé vert (de gauche à droite) correspond à la trajectoire GPS (Précision :  $\pm 2,05\text{m}$  à gauche de l'ombre sur l'image du pont et  $\pm 9,79\text{m}$  à droite de l'ombre du pont sur l'image) enregistrée sur le terrain. Le tracé jaune représente le trajet 2D calculé par U-MAP grâce aux données des hydrophones. Les distances moyennes entre les points synchronisés (N= 4) sont de 7,78m.

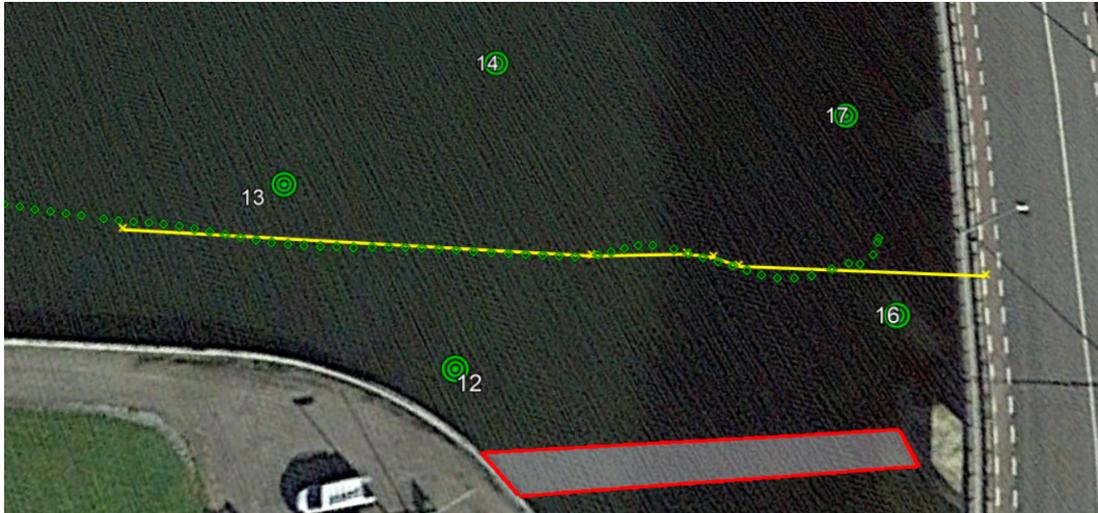


Figure 11: Calcul d'une seconde trajectoire d'un émetteur acoustique à travers le réseau d'hydrophone par le logiciel U-MAP comparé à la trajectoire enregistrée par GPS.



Figure 12 : Calcul des positions d'émetteurs immobiles dans le réseau d'hydrophones par le logiciel U-MAP

La Figure 12 représente le troisième test de mapping 2D avec un émetteur en position fixe (PF) cette fois. Les cercles rouges PF1 et PF2 sont les points pris par GPS, avec une précision respective de 0,8m et 2,6m (influence du pont). Les marques jaunes sont les positions calculées par U-MAP au cours du test. Les points calculés par U-MAP s'écartent en moyenne de 0,89m du point PF 1 mesuré au GPS et de 4,30 m du point PF 2.

Ces tests montrent la précision des trajectoires calculées par le logiciel à partir des données des hydrophones et il a été décidé d'ajouter un hydrophone au centre du réseau pour renforcer cette précision à l'intérieur et l'étendre en périphérie du réseau.

## 2.5 Implantation du réseau d'hydrophones

### 2.5.1 Méthodes d'implantations des hydrophones

Les hydrophones ont été placés en différents points sur chaque site étudié grâce à deux méthodes distinctes selon l'accessibilité de ces points : depuis la rive / culées de barrages (Figure 13) ou depuis un bateau (Figure 14).

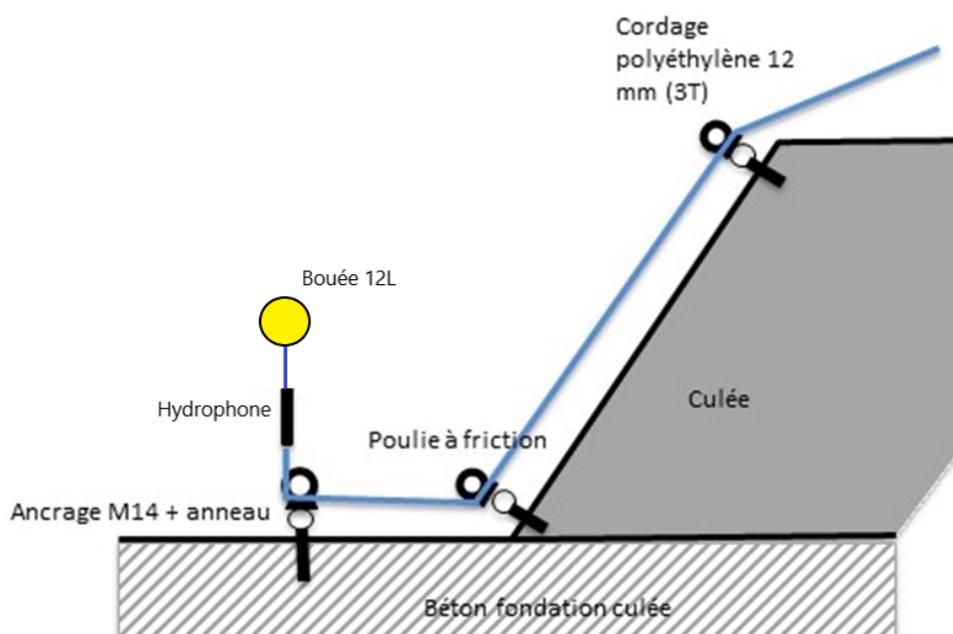


Figure 13 : Schéma du système d'implantation d'un hydrophone accessible depuis la rive ou une culée de barrage

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.

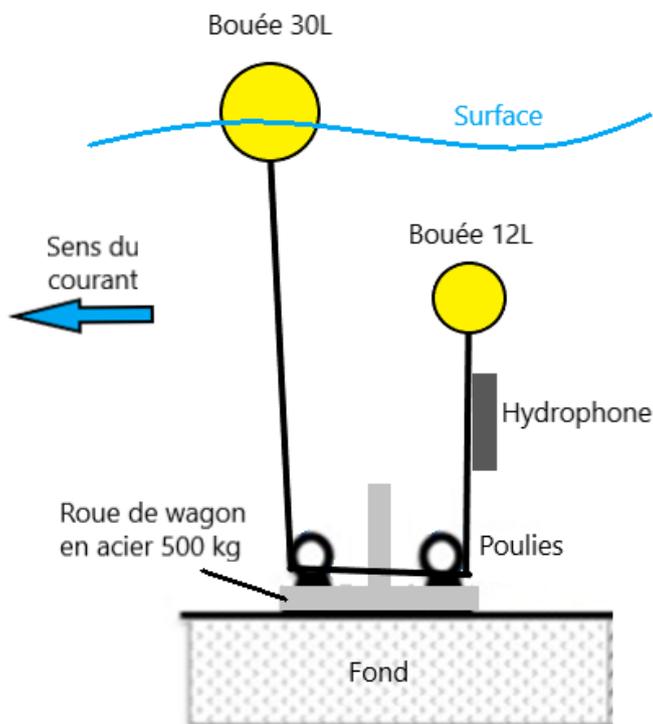


Figure 14: Schéma d'implantation d'un hydrophone accessible depuis un bateau

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 Ivaz-Ramet). Le corps mort servant de point d'ancrage est constitué d'une roue de wagon en acier de 500kg sur laquelle a été soudé 2 poulies, ce dispositif fabriqué depuis la rive 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.

### 2.5.2 Grands-Malades

Le site de Grands-Malades (barrage, centrale, écluse et station aval) est équipé avec un total de 15 hydrophones depuis le 16/09/2019. Les appareils N°12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 composent le réseau additionnel servant au mapping 2D des trajectoires des poissons à l'approche de la centrale et de la barrière électrique. Le reste des appareils permettent de déterminer les voies de passage (barrage, prise d'eau ou écluse) et la station aval située à 600m de l'ouvrage confirme le franchissement des individus.

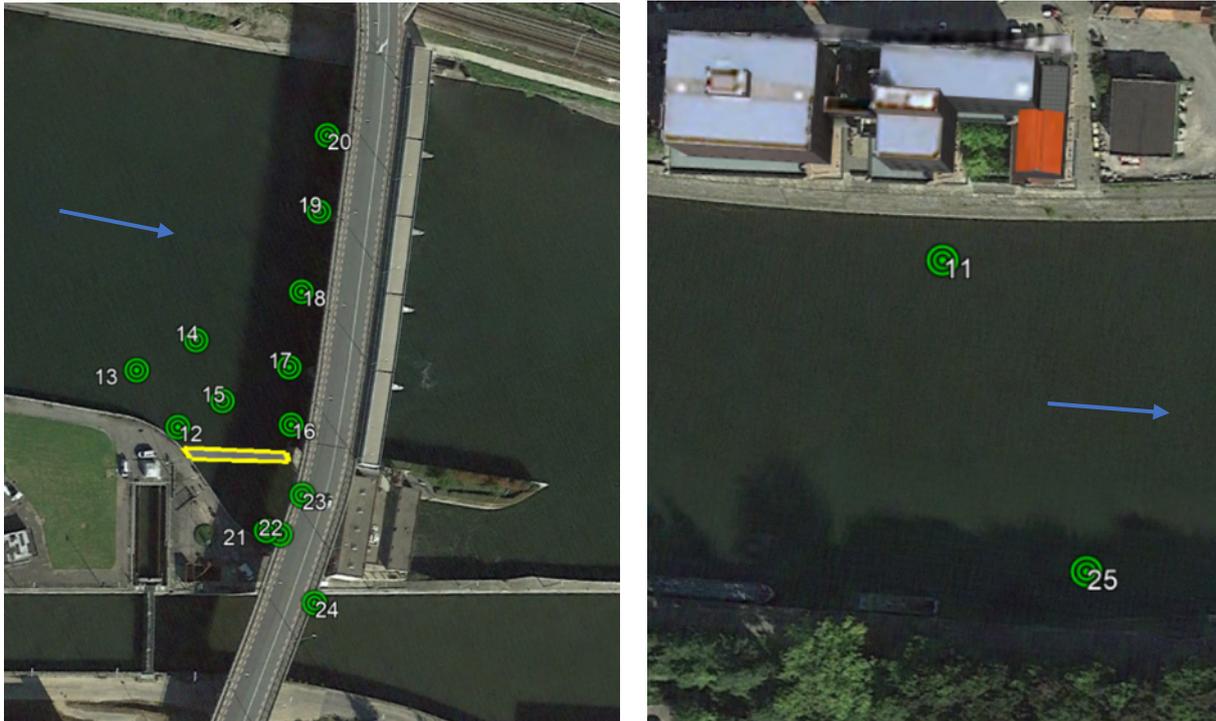


Figure 15: Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (en vert) implanté sur le site de Grands-Malades, la barrière électrique est représentée en jaune. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue.

Toutes les bouées ont été positionnée par un GPS différentiel sous des conditions d'eau très calme sans vent, ce qui permet de garantir que les bouées étaient bien au droit des hydrophones. La position des hydrophones est ainsi relevée avec une marge d'erreur d'1 cm sur la bouée, et donc de quelques centimètres (non quantifiable) entre la bouée et l'hydrophone. Les positions GPS sont reprises en annexe I.

### 2.5.3 Andenne

Le site d'Andenne est équipé avec un total de 9 hydrophones depuis le 19/09/2019, quatre couvrent le barrage, deux couvrent la prise d'eau de la centrale, un est placé dans l'écluse et deux en station aval (1800m de l'ouvrage).



Figure 16 : Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (en vert) implanté sur le site d'Andenne. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue.

#### 2.5.4 Ampsin-Neuville

Le site d'Ampsin Neuville est équipé avec un total de 9 hydrophones depuis le 19/09/2019 : 2 dans la prise d'eau de la centrale, 4 pour couvrir le barrage, 1 dans l'écluse et 2 en station aval (3km).

Au cours de l'étude, le 31/10/2019, la dernière culée du barrage à proximité des travaux été remise en eau et était à nouveau fonctionnelle. Les conditions climatiques et de débits de la Meuse n'ont pas permis de programmer une intervention des plongeurs à cet endroit pour positionner un nouvel hydrophone avant la fin de l'étude.

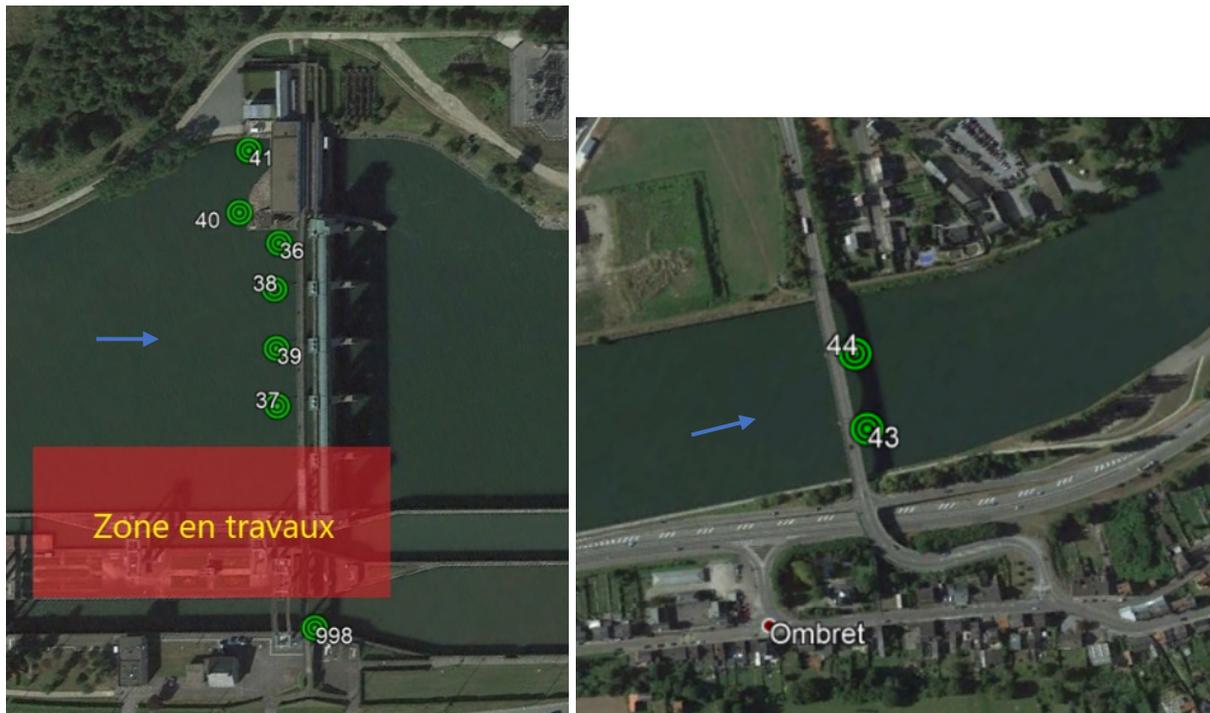


Figure 17: Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (en vert) implanté sur le site d'Ampsin-Neuville. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue. En rouge, la zone mise hors eaux dans le cadre des travaux de construction de la nouvelle écluse.

### 2.5.5 Ivoz-Ramet

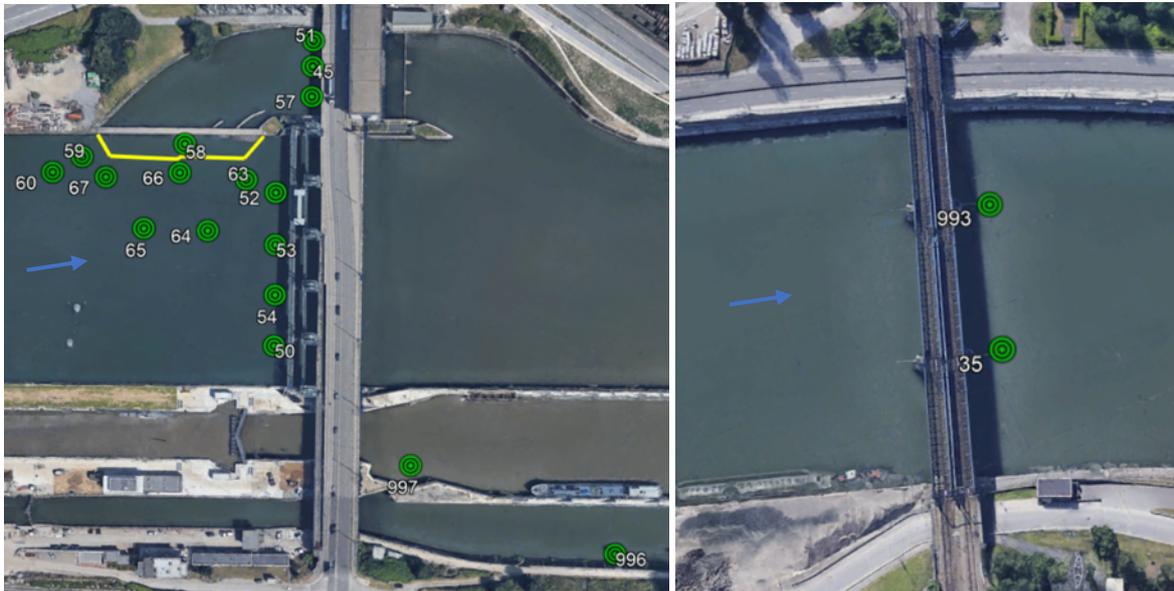


Figure 18: Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (en vert) implanté sur le site d'Ampsin-Neuville. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue. La barrière à bulles est représentée en jaune.

Le site d'Ivoz-Ramet est équipé avec un total de 19 hydrophones depuis le 26/09/2019 : 3 dans la prise d'eau, 12 pour le réseau 2D autour de la barrière à bulles (en jaune) et le barrage, 1 dans chaque écluse et 2 en station aval (1500m).

Toutes les bouées ont été positionnées par un GPS différentiel sous des conditions d'eau très calme sans vent, ce qui permet de garantir que les bouées étaient bien au droit des hydrophones. La position des hydrophones est ainsi relevée avec une marge d'erreur d'1 cm sur la bouée, et donc de quelques centimètres (non quantifiable) entre la bouée et l'hydrophone. Les positions GPS sont reprises en annexe I.

## 2.5.6 Monsin et canal Albert



Figure 19: Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (en vert) implanté sur le site d'Ampsin-Neuville. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue.

Le site de Monsin est équipé avec un total de 10 hydrophones depuis le 20/09/2019 : 3 dans la prise d'eau, 5 sur le barrage et 2 en station aval (500m). Le barrage de Monsin est actuellement en travaux, lors de la mise en service des hydrophones, les 3 vannes du barrage en partant de la rive droite n'étaient pas fonctionnelles, elles ont été remises en service au cours de l'étude. L'embouchure du canal Albert est équipée avec 2 hydrophones (N°994 et 995) sous le pont Marexhe.

### 2.5.7 Lixhe

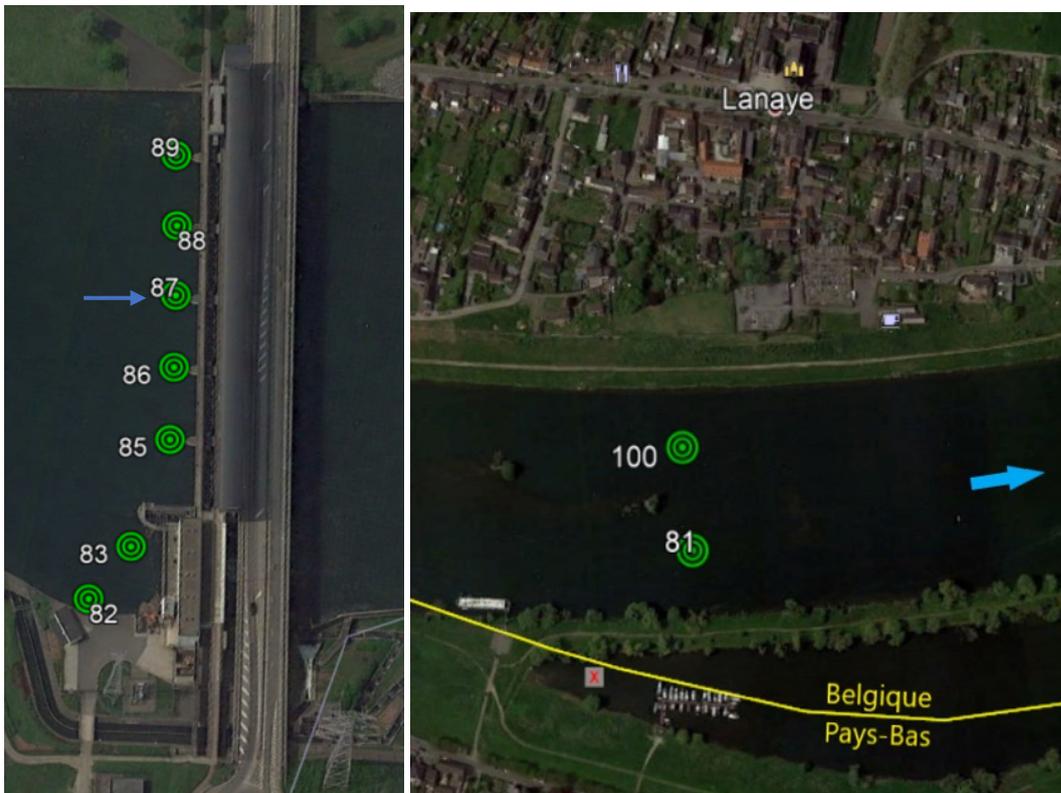


Figure 20 : Vue de l'ensemble du réseau d'hydrophones (en vert) implanté sur le site d'Ampsin-Neuville. Le sens du courant est représenté par la flèche bleue.

Le site de Lixhe est équipé avec un total de 9 hydrophones depuis le 20/09/2019 : 2 dans la prise d'eau, 5 sur le barrage et 2 en station aval (3,5km ; depuis le 14/10/2019).

## 2.6 Capture et marquage des anguilles

L'étude porte sur la dévalaison des anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) adultes, dites au « Stage d'argenture », qui caractérise les individus pouvant potentiellement commencer leur migration. Nous avons utilisé l'indice d'argenture décrit par Durif (2003) et Durif *et al.* (2005) pour sélectionner les individus de stade FIV et FV qui correspondent aux femelles argentées migrantes. L'objectif initial d'effectif d'anguilles marquées avec des tags acoustiques est de 150 individus. Ceux-ci devaient provenir en priorité de la pêcherie mise en place dans le cadre de l'action D2.

### 2.6.1 Pêcherie en Meuse wallonne

En collaboration avec les équipes de l'UNamur, des campagnes de pêches hebdomadaires ont été réalisées au niveau des prises d'eau des centrales hydroélectriques d'Andenne, Ampsin et Lixhe. Nous avons assumé que les prises d'eau des centrales ne sont pas des zones de résidence des anguilles et que les individus capturés dans ces zones ont de plus grandes chances d'être des individus en migration.

Les engins de pêche sont des filets Verveux sans « ailes » (filets annexes formant un V au niveau de l'ouverture) de 2,50m de long avec un diamètre de 55cm en ouverture, assemblés par 5 les uns derrière les autres avec une séparation d'environ 1m entre chaque pour former une ligne de filets

(N°4 sur la Figure 21). Le dispositif est maintenu au fond de l'eau par 2 chaînes à chaque extrémité de la ligne (N°2 et 5) et ancré par une ancre « charrue » de 15kg. La mise en place et la relève du dispositif s'effectue depuis un bateau et à la main, 3 lignes de 4 à 5 verveux sont installées par site parallèles les unes aux autres et l'ouverture des filets orientées vers les grilles des turbines (total : 15 filets / site).

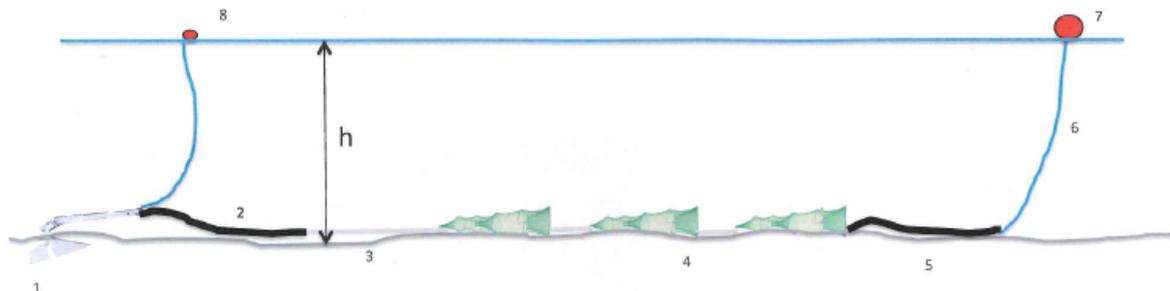


Figure 21: Schéma d'une ligne de verveux.  $h$  = profondeur (m); 1 : Ancre charrue 15kg, 2 : chaîne amont (longueur  $h$ ), 3 : cordage de queue (longueur  $h$ ), 4 : Verveux ; 5 : chaîne aval (longueur  $h$ ) ; 6 : cordage d'attache de la bouée ; 7 : Bouée de relève des verveux ; 8 : Bouée de relève de l'ancre.

Les pêcheries se sont déroulées du 03/07/2019 au 07/01/2020 à raison d'une relève par semaine sauf en cas des conditions climatiques et hydrologiques défavorables (débit > 300m<sup>3</sup>/s). La totalité des anguilles capturées ont été marquées avec des PIT tags pour pouvoir les identifier en cas de recapture. Seules les anguilles capturées après le 30/09/2019 ont été équipées d'un émetteur acoustique pour le suivi de la dévalaison (N = 29) qui n'a pas pu démarrer plus tôt en raison d'un décalage de calendrier de l'installation des barrières sur CHG et CHR.

Ne pouvant pas atteindre l'objectif de 150 anguilles originaires de Meuse marquées en télémétrie acoustique, nous avons fait appel à un pêcheur professionnel pour compléter les effectifs (N = 111) avec des anguilles argentées originaire du Rhin début Novembre. Un total de 140 anguilles marquées en acoustique et RFID a été déversées en Meuse (effectif des stades d'argenture :  $N_{SF V} = 18$ ,  $N_{SF IV} = 119$ ,  $N_{VF III} = 2$ ). Le tableau suivant reprend les caractéristiques générales de l'ensemble de ces individus. Les tailles des nageoires pectorales et des yeux sont des données morphométriques utilisées pour le calcul du stade d'argenture.

Tableau 1 : caractéristiques morphométriques des anguilles utilisées dans le suivi télémétrique.

	Taille (mm)	Poids (g)	Nageoire pectorale (mm)	Diamètre Vertical œil (mm)	Diamètre Horizontal œil (mm)
<b>MOYENNE</b>	898	1450	42,6	10,9	9,9
<b>MAX</b>	1081	2554	52,9	13,5	13,0
<b>MIN</b>	704	723	34,0	8,6	8,2
<b>ECART-TYPE</b>	66	330	3,1	0,7	0,6

## 2.6.2 Marquage acoustique

Les anguilles issues de la Meuse ont été marquées entre le 30/09/2019 et le 6/12/2019 en fonction de leur date de capture. Les anguilles en provenance du Rhin ont été marquées le 6-7-8 Novembre 2019.

Toutes les anguilles capturées à Andenne, Ampsin, Lixhe et dans le Rhin ont été ramenées sur le site d'Andenne où s'effectuait le marquage. Dans un premier temps, les anguilles sont anesthésiées dans un bac d'eau aéré contenant 0,8 ml/l d'eugénol 10% pendant 10-15 minutes, les tags et les outils chirurgicaux sont, pendant ce temps, stérilisés avec de l'alcool à 90°.

Une fois l'individu endormi, les mesures biométriques sont prises (taille, poids, dimension des yeux et des nageoires) et une incision de 2-3 cm dans la cavité péritonéale est réalisée pour y introduire l'émetteur acoustique et le PIT tag puis recousu avec 3 points de sutures.

A la fin de l'opération, l'anguille est placée dans un bac de stabulation aéré pendant 24h pour observer le bon déroulement du réveil et l'état de santé général de l'individu. Aucun individu n'est mort dans les 24h suivant son opération et tous avaient de bons signes vitaux avant leur déversement.

### 2.6.3 Lieux de déversement des lots

Les 140 individus marqués ont été répartis en 5 lots correspondant à 5 lieux de déversement différents :

LOT	N ANGUILLES	LIEUX	LATITUDE	LONGITUDE
1	98	Wépion	50.407375°	4.882888°
2	6	Viaduc de Beez	50.474048°	4.935060°
3	17	Gives	50.510777°	5.154343°
4	17	Amay	50.534163°	5.313057°
5	2	Aval Ivoz-Ramet	50.591325°	5.466610°

### 2.7 Téléchargement des données des hydrophones

Le téléchargement des données enregistrées dans les hydrophones a été réalisé mensuellement tout au long de l'étude, de Septembre à la mise en service du réseau à Mars lors du retrait des hydrophones. Les conditions climatiques et les débits très importants entre Janvier et Février 2020 ont rendu impossible l'accès à la majorité des appareils. Dès lors, 5 campagnes de téléchargements ont été menées en Octobre, Novembre, Décembre, Janvier et Mars.

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. Le logiciel nous permet de réaliser un diagnostic rapide de l'état de l'Hydrophone (bonne réception des signaux extérieurs et des beacons). Le temps des horloges internes des appareils s'écoule plus lentement que celui de l'horloge universelle (UTC) de l'ordre de quelques secondes par jours. Lors du téléchargement, cette dérive temporelle est mesurée en comparant l'horloge interne et l'horloge du PC qui est réglé en UTC 0, puis enregistrée pour pouvoir resynchroniser les données lors de l'analyse.

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 dès le retour au bureau. 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 pour un nouveau mois d'écoute.

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.

## 2.8 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. La base de données regroupant l'ensemble des détections de beacon comporte 110 623 231 détections.

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. En effet les hydrophones génèrent d'une part des « faux ID » (ID ne correspondant pas à un poisson marqué) et d'autre part des « fausses détections » (fausses détections d'ID correspondant à un poisson marqué). Si les premiers ont pu être aisément filtrés, les seconds ont nécessité la mise en place d'un filtre spécifique. Les données sont exportées sous forme de fichier « .csv » et comportent l'ensemble des détections enregistrées depuis la mise en route de l'hydrophone. Pour chaque détection, la date, l'heure, l'ID de l'émetteur et la puissance du signal sont renseignés.

- **Suppression des fausses détections**

Les premières données à supprimer sont les codes enregistrés qui ne correspondent à aucun des ID marqués. Seuls les 140 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  $\Delta t$ .

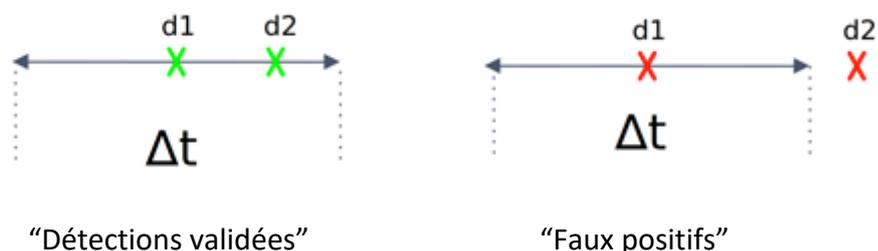


Figure 22: Principe de filtration des faux positifs pour deux détections 'd1' et 'd2'

Dans le cas présent et dans l'étude de 2017, différents  $\Delta t$  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.



Enfin, dans le cas de suspicion de non-détection lors des passages, un contrôle manuel dans les données est effectué afin de vérifier s'il n'existe pas de détection unique pouvant correspondre à un passage très rapide de l'anguille dans un délai de 24h de l'heure de passage présumée de l'anguilles.

Étant donné le délai d'émission 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.

## 2.9 *Traitement des données spatialisées*

Sur les sites de Grands Malades et Ivoz Ramet, 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 a permis d'obtenir ces positions pour chacun des individus ayant fréquentés la zone équipée.

La figure ci-après présente les réseaux d'hydrophones utilisés lors de chacune des campagnes sur chacun des 2 sites (Figure 23). Sur le site des Grands-Malades, 12 hydrophones ont été intégrés dans les calculs de spatialisation des données. Sur le site d'Ivoz Ramet, 12 hydrophones ont également été utilisés dans le réseau 2D.

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 24).

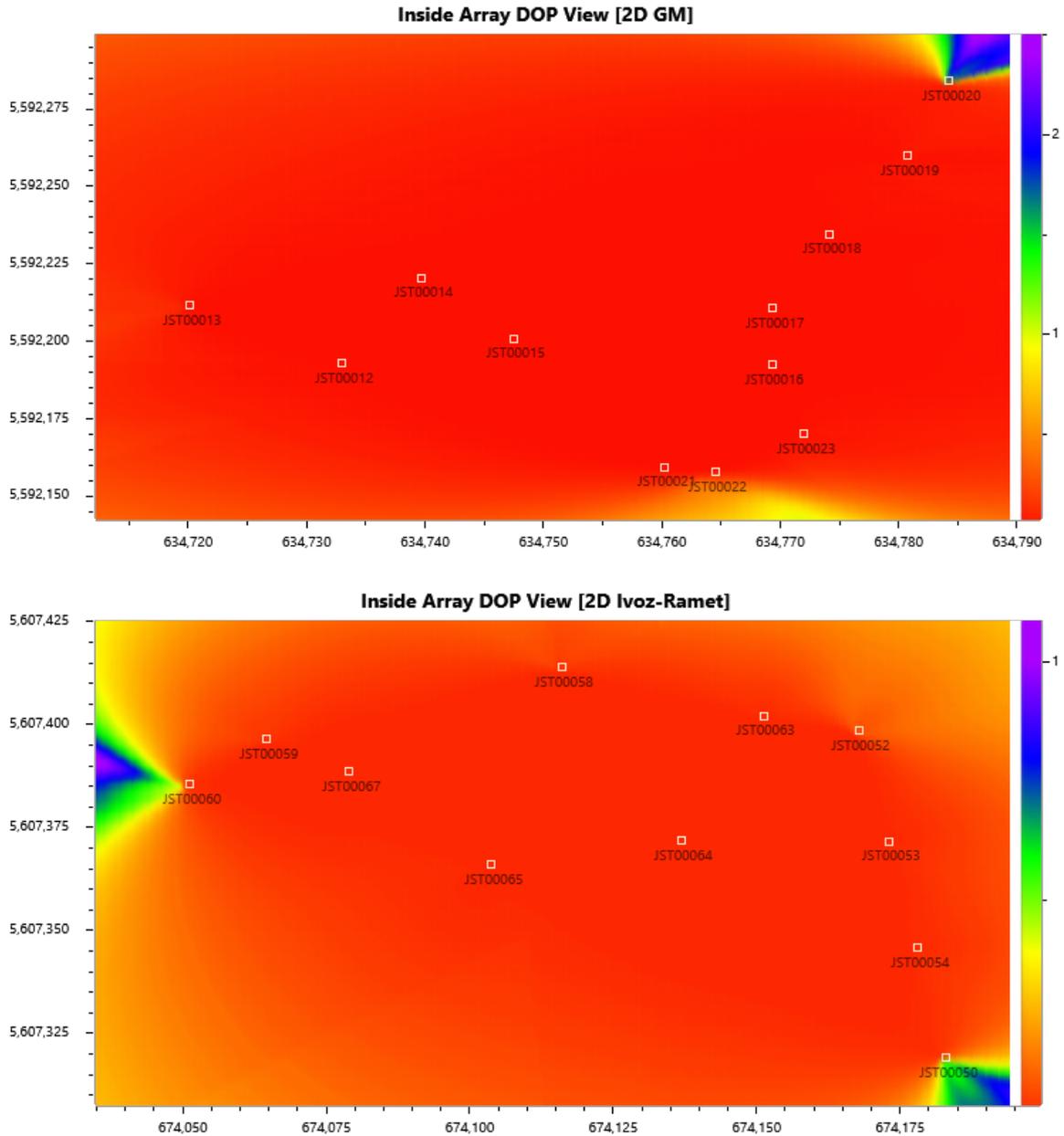
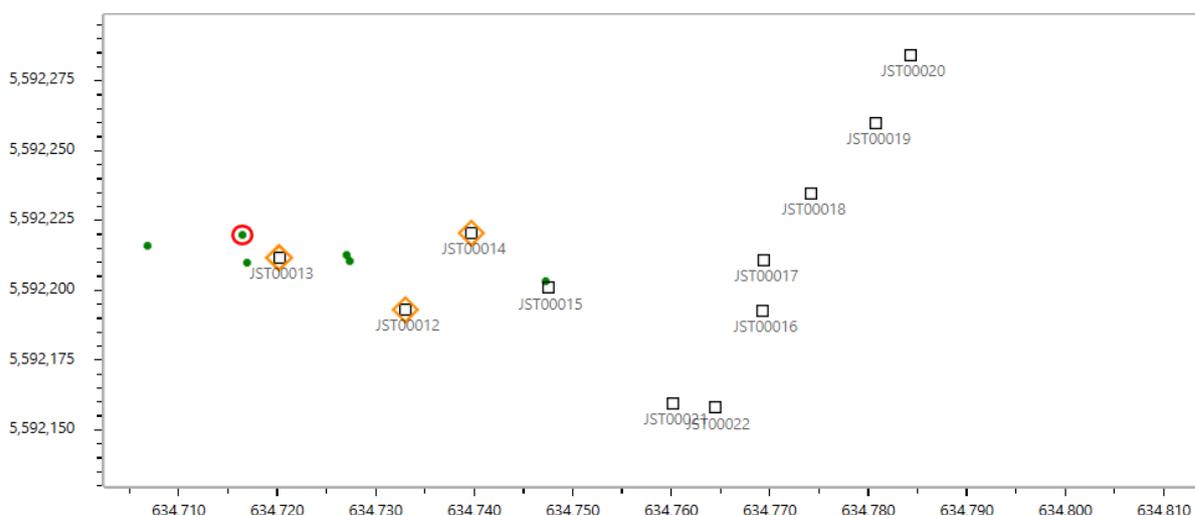


Figure 23 : Répartition théorique de la DOP (Dilution of Precision, sans unité) au sein des réseaux d'hydrophones de Grands-Malades (au-dessus) et d'Ivoz-Ramet (en dessous).

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.



	Time	UTM X (m)	UTM Y (m)	Hydrophones	DOP	Receiver SN
1	<input checked="" type="checkbox"/> 08 Nov 2019 15:15:07.27660	634716.49	5592219.86	3	0.62	12-13-14
2	<input checked="" type="checkbox"/> 08 Nov 2019 15:15:49.22922	634706.84	5592216.24	3	1.82	12-13-15
3	<input checked="" type="checkbox"/> 08 Nov 2019 15:16:58.18996	634716.98	5592209.91	3	0.27	12-13-15
4	<input checked="" type="checkbox"/> 08 Nov 2019 15:17:19.18818	634727.09	5592212.53	3	0.16	12-13-15
5	<input checked="" type="checkbox"/> 08 Nov 2019 15:17:22.18885	634727.3	5592210.5	3	0.11	13-14-15
6	<input checked="" type="checkbox"/> 08 Nov 2019 15:18:10.18954	634747.29	5592203.16	3	0.14	13-14-15

Figure 24 : Exemple de données de positionnement (points verts) issues du traitement des données spatialisées pour l'ID 41014 à Grands-Malades.

L'ensemble des données de positions de chaque émetteur a été compilé au sein de 2 bases de données (GRANDS MALADES et IVOZ RAMET) et analysé à l'aide du logiciel R et de scripts automatisés et réutilisables pour chaque campagne.

### 2.10 Analyses statistiques

Pour analyser les liens et les différences entre les voies de passage des anguilles, les débits, les heures de franchissement et les vitesses sur chaque tronçon de Meuse, nous avons recouru à des tests non paramétriques : Kruskal-Wallis, Mann-Whitney, corrélation de Spearman.

### 3 RESULTATS

#### 3.1 Retour d'expérience sur l'aspect matériel

Au cours de ce suivi automnal, sur les 73 hydrophones installés, 8 hydrophones ont été arrachés de leur position par des embâcles lors des crues survenues entre Janvier et Février 2020. Grâce au fait qu'ils soient restés accrochés à leur bouée, 3 de ces hydrophones ont pu être récupérés par les dégrilleurs des centrales hydroélectriques en aval de leur position initiale ou par des particuliers en bateau. 5 hydrophones n'ont, à ce jour, pas encore été retrouvés. La violence des chocs avec des embâcles ou les frictions continues ont causés des dégâts irréparables sur 2 hydrophones désormais hors service et des dégâts mineurs sur 6 autres hydrophones. Les dégâts irréversibles concernent donc 9,6% des équipements déployés.

Lors de la campagne de retrait de tous les hydrophones en Mars, les plongeurs ont dû intervenir sur la majorité des systèmes d'ancrages pour pouvoir récupérer les hydrophones. Ils ont constaté une accumulation importante de débris et déchets de nature diverse accumulés sur les systèmes de poulies ainsi qu'une forte usure des cordages empêchant la récupération des hydrophones de manière conventionnelle. Les mesures de restrictions d'accès aux sites d'EDFL et les règles de distanciations sociales imposées par le gouvernement pour cause de pandémie mondiale au coronavirus ont causés l'allongement des délais dans la réalisation de la campagne de retrait des hydrophones qui s'est prolongée jusqu'au 08/04/2020.

Un problème d'autonomie des batteries est survenu sur tous les hydrophones de l'étude. Théoriquement, le constructeur des hydrophones LOTEK estime l'autonomie des hydrophones à 200j avec le type de batteries choisi recommandé. La majorité des hydrophones ayant été démarrés début Septembre, leur autonomie théorique leur permettait un fonctionnement jusque début Avril, l'étude prenant s'arrêtant début Mars. Or des appareils se sont éteints au cours de l'étude et l'origine du problème n'a pu être détectée que tardivement. À Grands-Malades, 4 hydrophones se sont arrêtés de façon précoce ce qui a occasionné une perte de données importante au niveau du barrage. Lors du téléchargement de Novembre, le problème avait été mal diagnostiqué et ce n'est qu'en Janvier que la qualité des batteries a été mise en cause (date de fabrication de 2015). Les autres appareils ont reçu des batteries de 2016 et 2017 ayant une autonomie mesurée de 102 à 156 jours contre les 200j prévus initialement. La majorité des appareils se sont arrêtés courant février, le stock de piles restant, mauvaises conditions météo et les restrictions dû à la pandémie mondiale n'ont pas permis de réaliser la maintenance adéquate.



Figure 25 : Périodes de fonctionnement des hydrophones du réseau au cours de l'étude sur les différents des sites. En Vert les périodes où les données ont été enregistrées, en Orange les périodes de dysfonctionnement non liées aux batteries (pannes, disparition des hydrophones...), en Rouge les périodes d'arrêts dû aux batteries.

L'Annexe 1 présente les graphiques de détection des beacons de chaque hydrophone. Dans un fonctionnement normal, l'hydrophone doit entendre son beacon interne toutes les 15 sec, soit 5.760 détections/24h. Les capacités de détection des hydrophones sont influencées de manière complexe par différents facteurs qui peuvent interagir : angle de positionnement de l'hydrophone, proximité avec une structure métallique ou en béton, frottement des particules d'eau et de sédiment sur sa surface lors des débits élevés, présence de gros embâcles, ... Par ailleurs, il arrive fréquemment qu'un hydrophone qui n'a pas un taux d'auto-détections normal entende parfaitement le beacon de l'hydrophone voisin, et soit entendu aussi par le voisin. Le constructeur n'explique pas ce phénomène. Les hydrophones que nous signalons comme ayant de faibles taux de détection ne sont donc pas systématiquement défectueux, mais peuvent renseigner d'une potentielle perte de portée de détection. Ces graphiques peuvent faciliter l'interprétation de certaines voies de franchissement.

### 3.2 Présentation des jeux de données

#### 3.2.1 Détection des anguilles

Au total, l'ensemble du réseau a permis d'enregistrer 195 151 détections pour 121 individus (86,4% des individus relâchés N = 140). Le taux de détection demeure élevé, même si plus faible que celui observé en 2017 (96% pour N = 150). Cela confirme deux éléments essentiels pour la suite des analyses :

- Le réseau d'hydrophones fonctionne globalement de manière satisfaisante ;
- Le marquage par opération chirurgicale a été bien réalisé avec une bonne survie et récupération post-opératoire.
- 

Le Tableau 2 reprend les informations des 19 anguilles n'ayant jamais été détectées par le réseau d'hydrophone disposé sur toute la Meuse wallonne. Ces anguilles sont considérées comme « non-migrantes ».

Tableau 2 : Ensemble des individus n'ayant pas été détecté par le réseau d'hydrophone.

DATE DE DEVERSEMENT	SITE D'ORIGINE	ID TAG ACOUSTIQUE	STADE D'ARGENTURE	LOT
01/10/2019	Andenne	39057	SF IV	1
25/10/2019	Meuse	13983	SF IV	1
25/10/2019	Andenne	46605	SF IV	1
25/10/2019	Meuse	2681	NA	1
06/11/2019	Lixhe	60754	SF IV	1
06/11/2019	Lixhe	29582	SF IV	1
06/11/2019	Lixhe	3696	SF IV	1
06/11/2019	Rhin	40042	SF IV	1
06/11/2019	Rhin	8665	SF IV	1
06/11/2019	Rhin	56307	SF IV	1
06/11/2019	Rhin	52417	SF IV	1
07/11/2019	Rhin	44064	SF IV	1
07/11/2019	Rhin	63270	SF IV	1
07/11/2019	Rhin	6402	SF IV	1
07/11/2019	Rhin	54881	SF IV	1
08/11/2019	Rhin	44451	SF IV	3
08/11/2019	Rhin	43648	SF IV	4
08/11/2019	Rhin	49904	SF V	4

25/11/2019	Ampsin	17684	SF IV	2
------------	--------	-------	-------	---

11 anguilles non dévalantes sont originaire du Rhin, ce qui représente 9,9% des 111 anguilles marquées originaire du Rhin. 8 anguilles non dévalantes sont originaire de Meuse, soit 27,6% des 29 pêchées et marquées en Meuse. Malgré l'importante différence entre les tailles des échantillons, la différence de proportion reste significativement plus élevée (Mann-Whitney test, p-value < 0,05) pour les anguilles originaires de Meuse, ce qui indique que les anguilles provenant des pêcheries en Meuse se sont mises moins en migration que celles du Rhin. 17 anguilles non dévalantes sont au stade SF IV (6,9% des N = 118 SF IV marquées), une seule SF V sur les 28 (3,6%) marquées n'a pas dévalé.

### 3.2.2 Positionnement 2D des anguilles

Après filtration de données avec un seuil de DOP  $\leq 2$  pour éliminer les positions aberrantes tout en conservant une précision optimale, l'algorithme de positionnement UMAP a permis de calculer les trajectoires empruntées par 42 individus à Grands-Malades et 30 individus à Ivoz-Ramet.

### 3.3 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, cycles nycthémeraux...) pour interpréter correctement les données.

#### 3.3.1 Dérive temporelle des hydrophones et conséquence sur l'interprétation des données non spatialisées.

Lors de l'étude de 2017, nous avons remarqué que tous les hydrophones étaient sujets à une dérive de leur horloge interne par rapport à l'horloge de référence du PC de terrain (en UTC) utilisé pour tous les téléchargements. Au moment de la récupération des données, la différence d'heure 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 2,69 secondes/jour, la plus élevée est de 6,34 secondes/jour pour une moyenne de 4,30 secondes/jour pour N = 76 hydrophones. 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 :

$\Delta_t$  = dérive temporelle (seconde / seconde)

Date<sub>Réf</sub> = Date et heure du PC au moment du téléchargement

Date<sub>Hydro</sub> = 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<sub>Enregistrée</sub> : date/heure de la détection réalisée par l'hydrophone

Date<sub>Lancement</sub> : date/heure du lancement de l'hydrophone

$\Delta_t$  : dérive temporelle (s/s)

### 3.3.2 Zones de détection et voies de passage de chaque site

Pour chaque site, nous avons défini un ensemble d'hydrophones qui couvre le barrage et un ensemble d'hydrophones qui couvre la prise d'eau pour discriminer les voies de passage. Grâce au retour d'expérience de l'étude de 2017 où certains hydrophones captaient des signaux aussi bien sur le barrage que dans la prise d'eau, leurs positions ont été corrigées en 2019 pour limiter cet « overlap ». Sur les sites de Grands-Malades et Ivroz-Ramet, les hydrophones qui composent le réseau 2D ne sont pas pris en compte pour déterminer la voie de passage d'une anguille.

Une fois les deux groupes d'hydrophones définis sur chaque site (Barrage vs Prise d'eau), nous avons regroupé l'ensemble des détections enregistrées sur tous ces hydrophones durant les 2 dernières minutes de détection. Une fois les deux groupes d'hydrophones définis sur chaque site (Barrage vs Prise d'eau), nous avons regroupé l'ensemble des détections enregistrées sur tous ces hydrophones durant les 2 premières minutes de détection comme en 2017. Comparativement, nous avons également affiné ce filtre pour une durée de 1 minute et 30 secondes, étant donné la synchronisation des données en 2019 contrairement à 2017. Il s'est avéré que la durée de 30 secondes pouvait être pris en compte pour la majorité des franchissements, les durées de 1 et 2 minutes ayant été conservées en cas de besoin d'interprétation.

Lorsque que plus de 80% des détections étaient enregistrées sur les hydrophones d'un des deux groupes, nous avons tranché en faveur de ce groupe. Si ce seuil de 80% lors des 30 dernières secondes n'est pas atteint, nous comparons la donnée avec le filtre 1 min et 2 min. Si aucun des 3 filtres ne permet d'atteindre le seuil de 80%, la voie de passage est classée comme « indéterminée ».

En dernier recours, l'état de fonctionnement du barrage, 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 « Centrale ». Dans le cas où le débit est reparti à la fois sur le barrage et la centrale, l'indétermination ne peut pas être levée.

### 3.3.3 Validation des passages

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, excepté à Lixhe où la station aval n'a pas été pleinement opérationnelle.

Lorsqu'il n'y aucune détection à l'aval du site après une détection sur l'amont, l'hypothèse retenue est celle du franchissement car les anguilles marquées sont en migration et que les retours en amont (hors approches multiples) se produisent essentiellement à très bas débits (voir étude 2017). Dès lors, une voie de passage est attribuée à l'individus selon la méthode décrite 3.3.2 mais sans confirmation aval, cette voie de passage est classée comme étant la dernière voie de passage avant disparition du poisson dont le détail sera donné en 3.8.

### 3.3.4 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 3 et comporte :

- L'ID, le Lot et la date/heure de déversement de chaque anguille
- La date/heure de la première et dernière détection à l'amont du site, ainsi que le temps de séjour sur le site
- La date/heure de la première détection à la station aval
- La vitesse de l'anguille calculée entre les deux stations les plus proches
- La vitesse approximative du courant dans la Meuse au moment de la détection
- La voie de passage (Barrage/Centrale/Ecluse/Indéterminée)
- Le moment de la journée au franchissement (Jour / Nuit)
- Les données manquantes sont signalées par un « NA » (*Not Available*)

### 3.4 Conditions environnementales durant l'étude

La Figure 26 ci-dessous présente l'évolution du débit moyen journalier (stations de référence d'Amay) et de la température enregistrée en Meuse à la station d'Andenne.

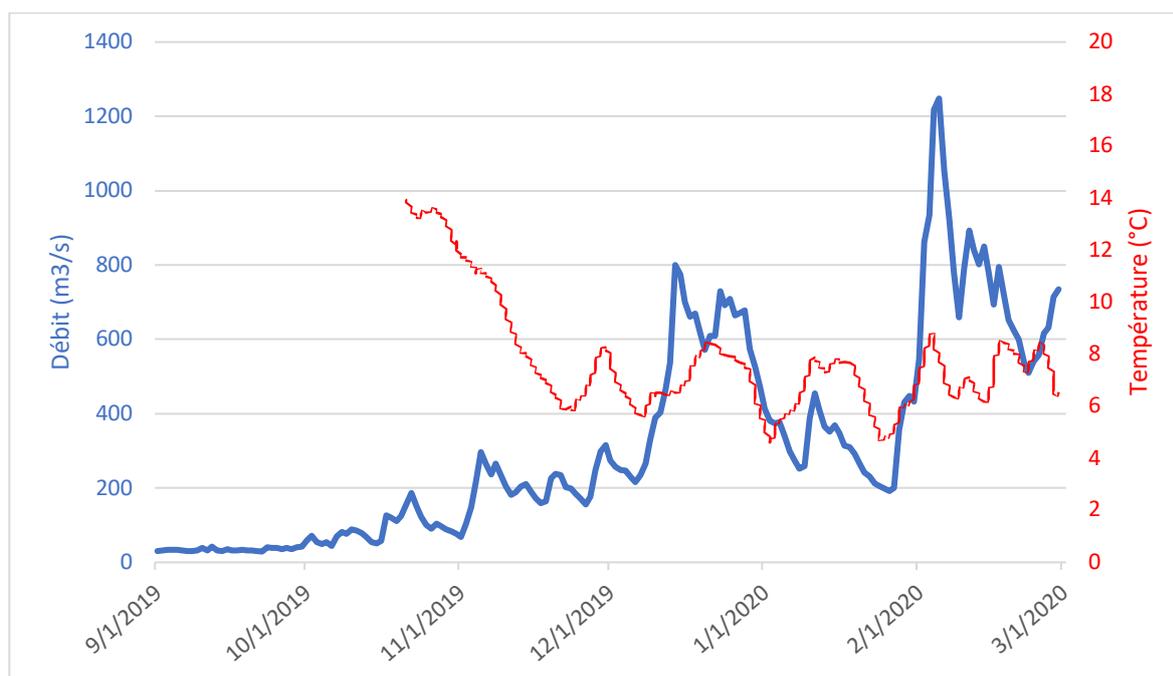


Figure 26 : Courbe d'évolution du débit et de la température (station : Amay) pendant la période de l'étude (Septembre 2019 – Mars 2020)

Sur toute la durée de l'étude, le débit journalier minimum de la Meuse à Amay est de 29,1 m<sup>3</sup>/s (22 Septembre 2019), le maximum de 1248,2 m<sup>3</sup>/s a été atteint le 5 Février 2020 et représente le plus haut pic de débit depuis Janvier 2011 (1792,7 m<sup>3</sup>/s). La station de mesure de la température de l'eau a été en place de mi-Octobre à début Mai. Pendant cette période, la température la plus basse enregistrée a été de 4,6°C, la plus haute de 16,2°C pour une moyenne de 8,8°C.

### 3.5 Synthèse des résultats sur chaque site

Afin de réaliser une synthèse des résultats obtenus pour chaque site, dans un premier temps les hydrophones des réseaux 2D de Grands-Malades et Ivoz-Ramet ont été retirés du jeu de données. Les variables suivantes ont été calculées :

- « **Présents amont** » : tous les individus observés dans le bief en amont du barrage (individus relâchés à proximité immédiate couplés aux individus ayant franchis les ouvrages amont)
- « **Déectés** » : tous les individus en migration détectés sur un site par l'ensemble du réseau situé sur le côté amont de celui-ci (barrage/turbine), hors stations aval.
- « **Confirmation aval** » : tous les individus en migration initialement présent dans le bief du site détecté au moins une fois sur la station aval d'un ouvrage ou sur un ouvrage suivant.
- « **Franchissement** » : tous les individus ayant été détectés à l'aval d'un ouvrage ou au site suivant, parmi lesquels on distingue ensuite les catégories suivantes :
  - « **Centrale** » : tous les individus ayant été détectés à plus de 80% par les hydrophones de la centrale au cours des 30 dernières secondes de détection.
  - « **Barrage** » : tous les individus ayant été détectés à plus de 80% par les hydrophones du barrage au cours des 30 dernières secondes de détection.
  - « **Écluse** » : tous les individus ayant été détectés pour la dernière fois avant leur franchissement par l'hydrophone de l'écluse
  - « **Possible Barrage / Centrale** » Tous les individus avec une voie de passage validée mais sans confirmation aval.
- « **Indéterminé** » : tous les individus pour lesquels le taux de détection sur une des voies est inférieure à 80% au cours des 120, 60 et 30 dernières secondes.
- « **Délais de franchissement** » : temps séparant la première et la dernière détection du réseau sur le site.

#### 3.5.1 Grands-Malades

98 individus ont été déversés en amont de Grands-Malades (Lot1). 83 (85%) ont été détectés au moins une fois par le réseau amont et 81 anguilles ont été redétectées sur un site ou une station en aval, donc 2 individus ont potentiellement franchi le site mais sans atteindre une station aval.

Les voies de franchissement se répartissent comme suit :

VOIE DE PASSAGE	NOMBRE D'INDIVIDUS
CENTRALE	18
BARRAGE	54
ECLUSE	0
INDETERMINE	9
POSSIBLE CENTRALE	1
POSSIBLE BARRAGE	1

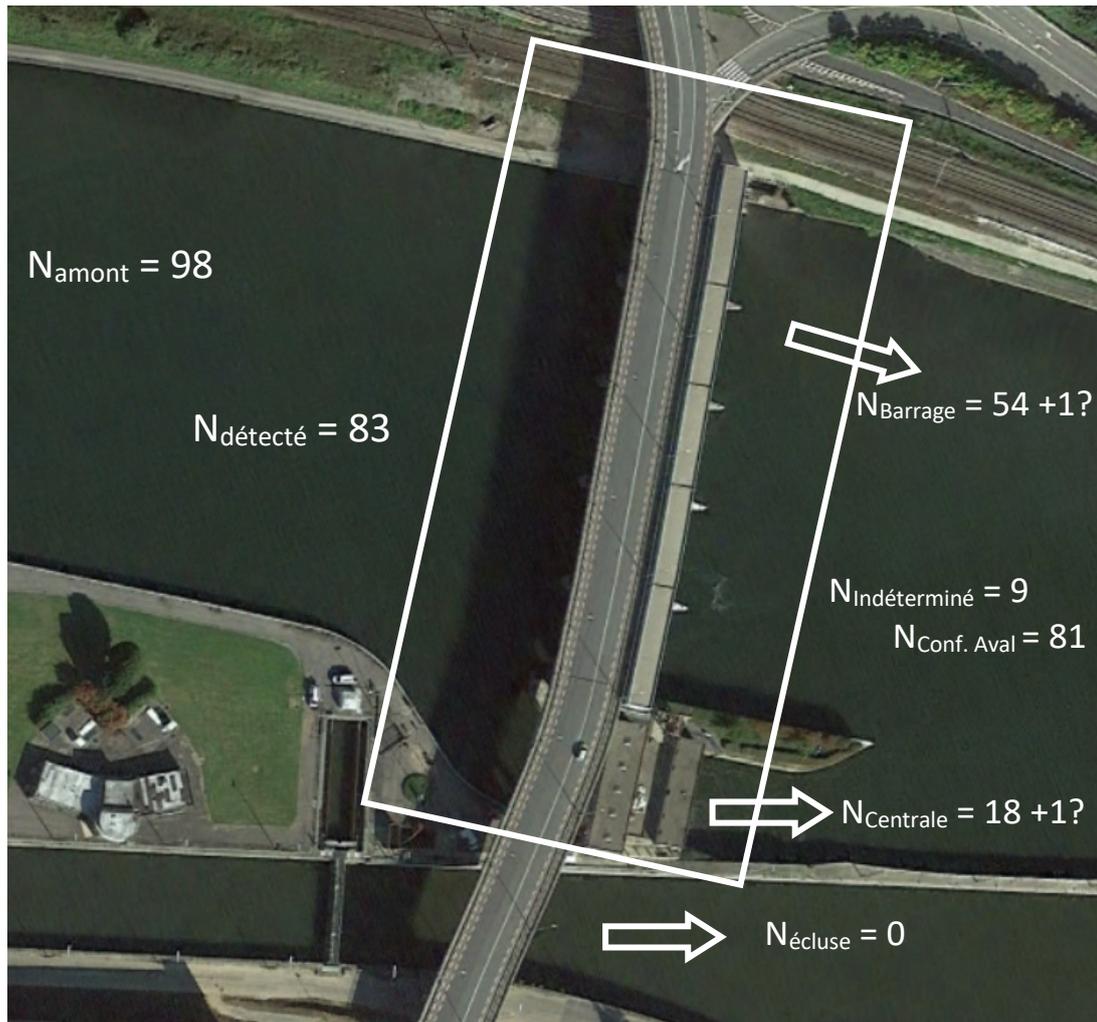


Figure 27 : synthèse des résultats obtenus sur le site de Grands-Malades.

Le délai médian de franchissement est de 1 min 44s, le délai maximum est de 164 h 10 min 37s (environ 7jours).

### 3.5.2 Andenne

Les 81 anguilles ayant franchies Grands-Malades et les 6 anguilles déversées dans le bief (Lot 2) totalisent donc 87 anguilles présentes en amont du site d'Andenne. 64 ont été détectées par le réseau du site et 11 anguilles ont franchi le site sans être détectées par le réseau (détectées par les stations aval) sous des conditions de débit fort. Il y a eu donc en tout 75 ID ayant possiblement franchi le site, dont 4 anguilles qui n'ont jamais été redétectées par des stations aval.

Les voies de franchissement se répartissent comme suit :

VOIE DE PASSAGE	NOMBRE D'INDIVIDUS
CENTRALE	1
BARRAGE	55
ECLUSE	1
INDETERMINE	14
POSSIBLE CENTRALE	1
POSSIBLE BARRAGE	3

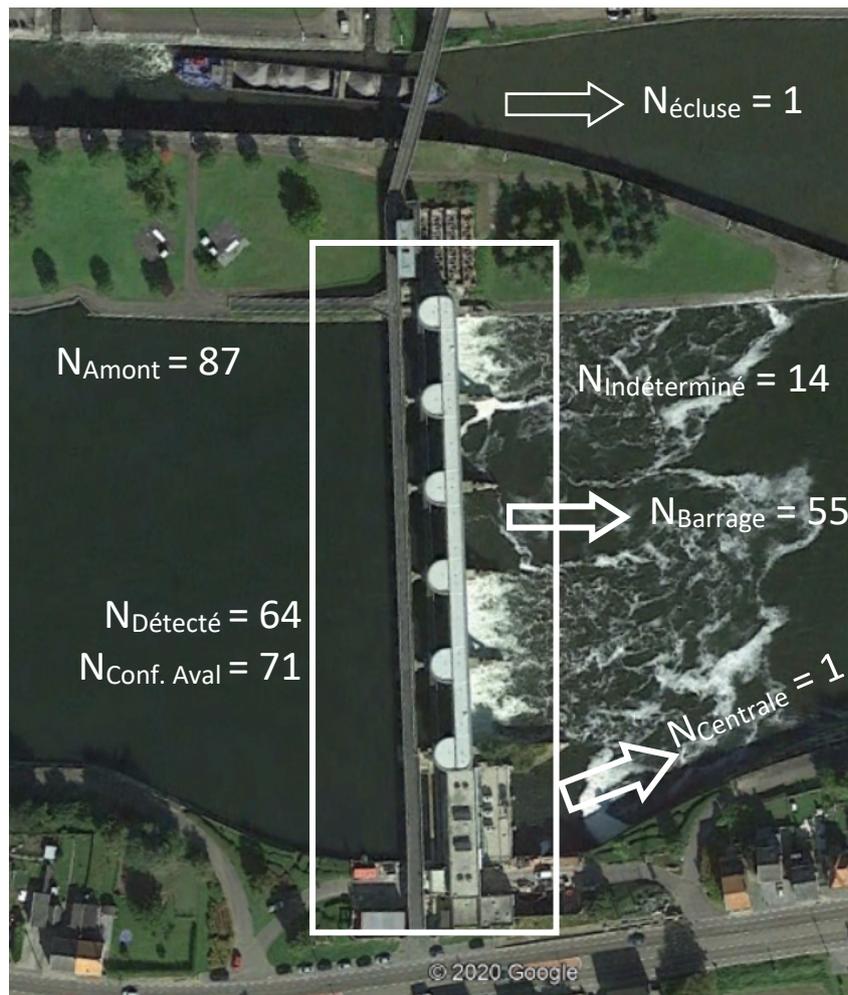


Figure 28 : synthèse des résultats obtenus sur le site d'Andenne

Le délai médian de franchissement est de 2 min 05 sec, le délai maximum est de 122h 23 min (5j). 3 individus ont mis plus de 24h à franchir le site.

### 3.5.3 Ampsin-Neuville

Les 75 anguilles ayant franchi le barrage d'Andenne et les 17 relâchées dans le bief (Lot 3) totalisent 92 anguilles présentes en amont du site d'Ampsin.

65 anguilles ont été détectées par le réseau et 13 anguilles ont franchi le site sans être détectées. Parmi les 78 anguilles ayant franchi le site d'Ampsin, 1 seule n'a pas été redétectée en aval.

Les voies de franchissement se répartissent comme suit :

VOIE DE PASSAGE	NOMBRE D'INDIVIDUS
CENTRALE	16
BARRAGE	46
ECLUSE	0
INDETERMINE	15
POSSIBLE CENTRALE	0
POSSIBLE BARRAGE	1

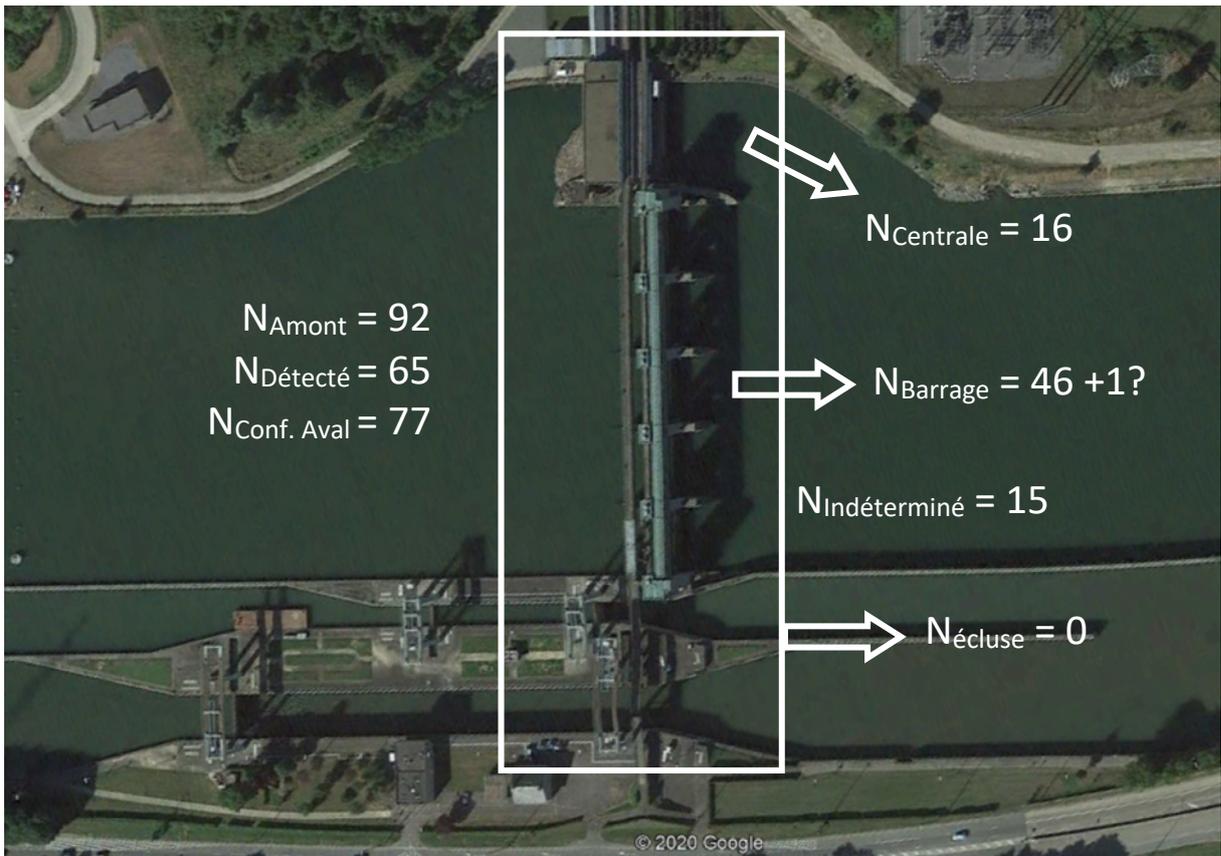


Figure 29 : synthèse des résultats obtenus sur le site d'Ampsin-Neuville

Le délai médian de franchissement est d'1 minute le délai maximum est de 36 jours. 2 individus ont mis plus de 24h à franchir le site.

### 3.5.4 Ivoz-Ramet

Les 78 anguilles ayant franchi le barrage d'Ampsin-Neuville et les 17 relâchées dans le bief (Lot 4) totalisent 95 anguilles présentes en amont du site d'Ivoz-Ramet. 76 anguilles ont été détectées par le réseau et 8 anguilles ont franchi le site sans être détectées sur le site. Parmi les 76 anguilles détectées au site d'Ivoz-Ramet, 8 ont potentiellement franchi le site mais n'ont pas été redétectées en aval.

Les voies de franchissement se répartissent comme suit :

VOIE DE PASSAGE	NOMBRE D'INDIVIDUS
CENTRALE	29
BARRAGE	31
ECLUSE	0
INDETERMINE	16
POSSIBLE CENTRALE	6
POSSIBLE BARRAGE	2

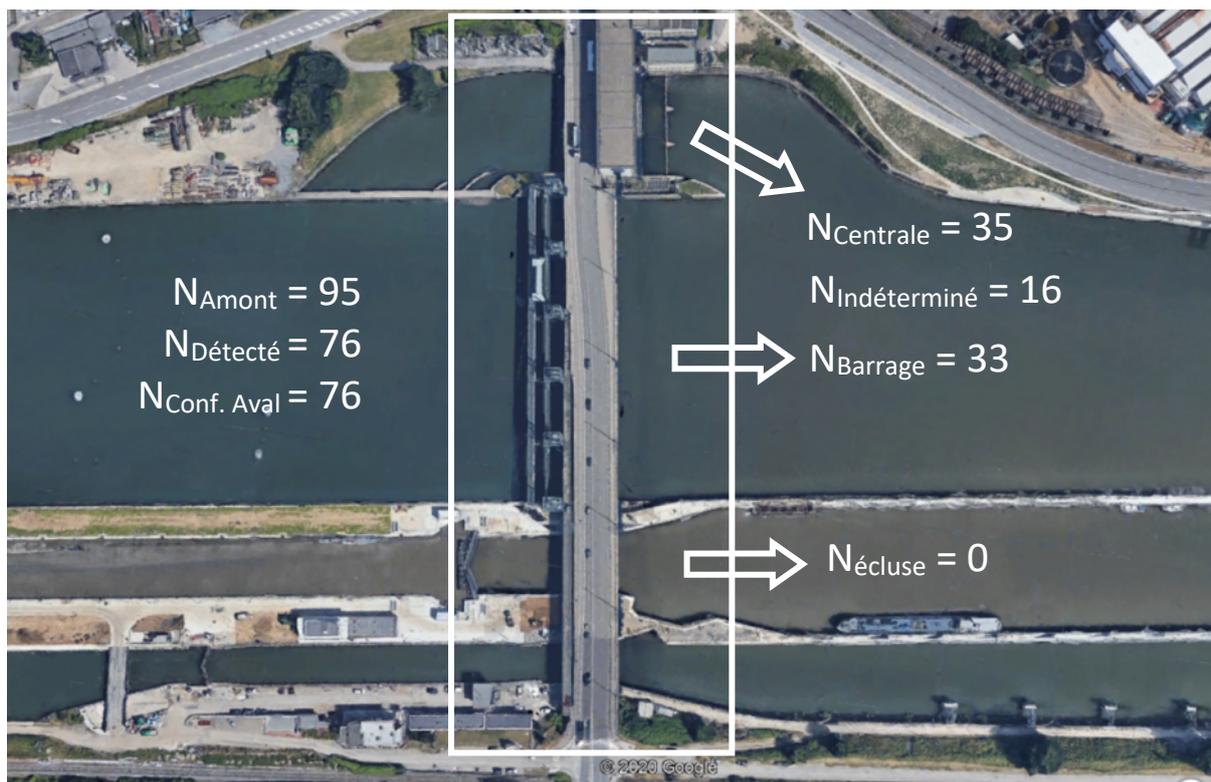


Figure 30 : synthèse des résultats obtenus sur le site d'Ivoz-Ramet

### 3.5.5 Monsin et Canal Albert

Les 84 anguilles ayant potentiellement franchi le barrage d'Ivoz-Ramet et les 2 relâchées dans le bief (Lot5) totalisent 86 anguilles en amont du site de Monsin et du Canal Albert.

3 anguilles ont été détectées dans le Canal Albert, 2 en sont ressorties car redétectées plus tard sur le réseau et 1 a disparue dans le Canal. Parmi les 2 anguilles ressorties, l'ID 48433 est entrée dans le Canal Albert le 09/11/2019 et en ressort le 21/12/2019, date où elle franchit le site de Monsin. La seconde anguille, ID 9146 dont le patron de dévalaison est repris dans la figure 31, est aussi entrée dans le Canal Albert le 09/11/2019 pour en ressortir le 23/11/2019, remonte jusqu'à la station aval de CHR (15,7 km) en 2 jours puis redescend vers le Canal le 28/11/2019 pour en ressortir rapidement et franchir le site de Monsin et Lixhe le même jour.

61 anguilles ont été détectées au barrage de Monsin et 12 anguilles ont franchi le site sans être détectées (confirmation aval). Les voies de franchissement se répartissent comme suit :

VOIE DE PASSAGE	NOMBRE D'INDIVIDUS
CENTRALE	11
BARRAGE	50
INDETERMINE	12
POSSIBLE CENTRALE	0
POSSIBLE BARRAGE	0

Le délai médian de franchissement était de 57 min, le délai maximum était de 2j et 1h.

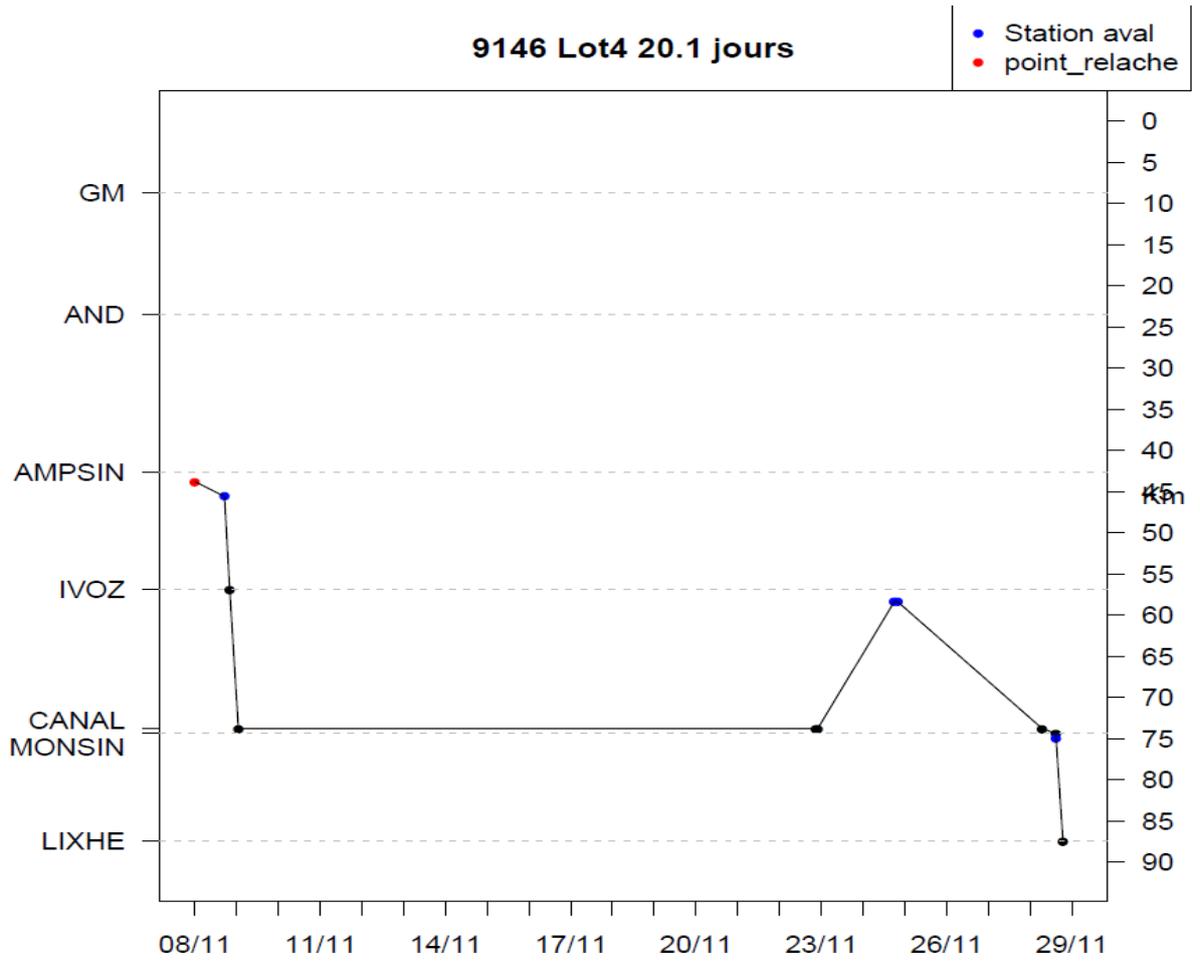


Figure 31 : Patron de dévalaison de l'anguille 9146 détectée dans le canal Albert

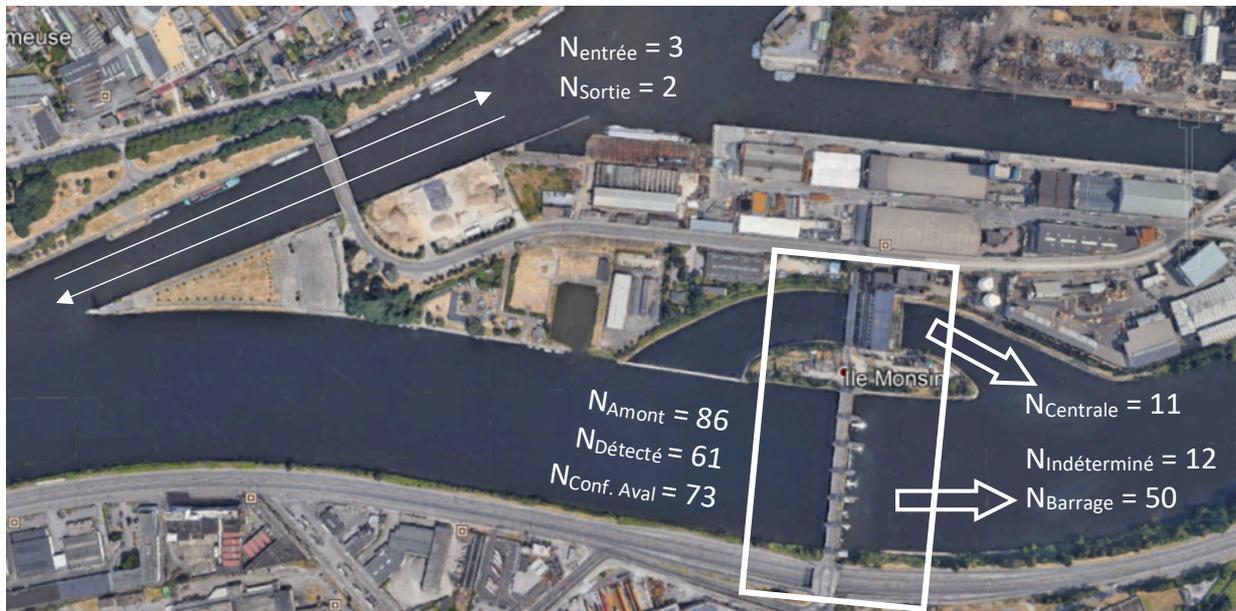


Figure 32 : Synthèse des résultats obtenus sur le site de Monsin et du canal Albert

### 3.5.6 Lixhe

Les 73 anguilles ayant franchi le barrage de Monsin étaient présentes dans le bief amont de Lixhe (N amont = 73). 69 anguilles ont été détectées par le réseau du site et 3 ont franchi le site sans être

détectées (confirmation aval), ce qui donne potentiellement 72 franchissements. L'un des hydrophones de la station aval étant défectueux, seulement 17 anguilles parmi les 69 détectées sur le site de Lixhe ont une confirmation de passage en aval.

Les voies de franchissement se répartissent comme suit :

VOIE DE PASSAGE	NOMBRE D'INDIVIDUS
CENTRALE	4
BARRAGE	63
INDETERMINE	5
POSSIBLE CENTRALE	0
POSSIBLE BARRAGE	0

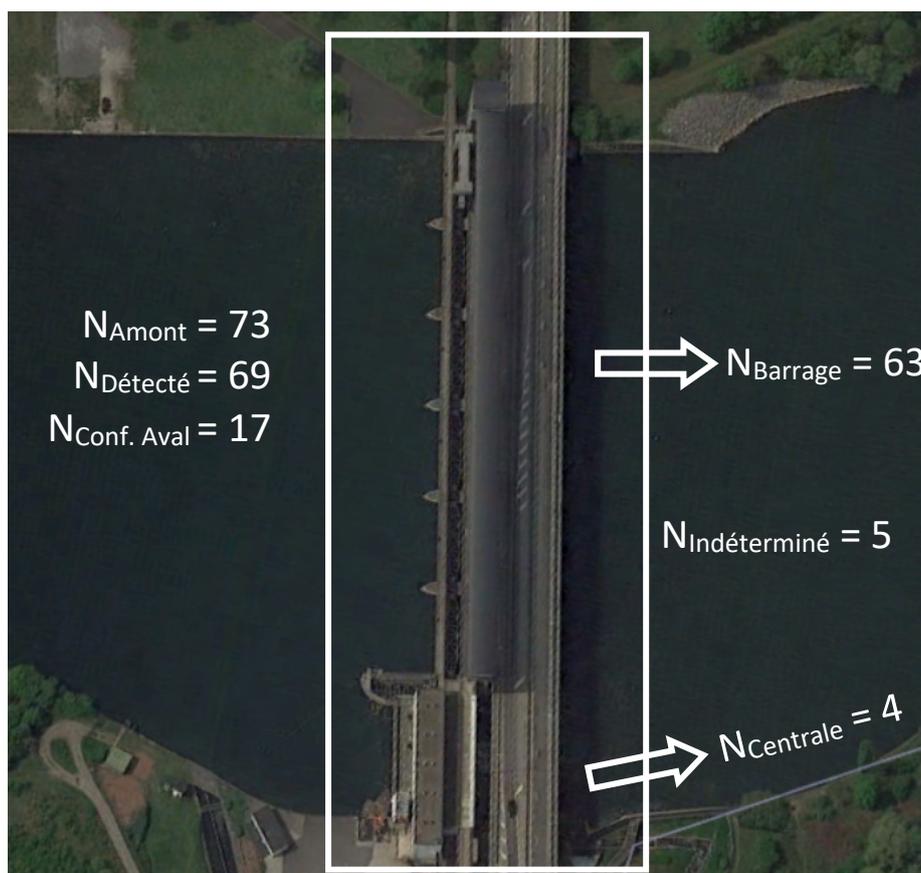


Figure 33 : Synthèse des résultats obtenus sur le site de Lixhe

Le délai médian de franchissement était inférieur à 1 min, le délai maximum était proche de 27h.

### 3.6 Capacité migratoire sur l'axe de migration

Pour l'ensemble des individus déversés durant l'étude, nous avons élaboré un graphique de migration longitudinale qui présente la progression du parcours de l'anguille dans la zone d'étude ponctuée par les ouvrages hydroélectriques et à travers le temps. Tous les graphiques individuels sont présentés en ANNEXE 2.

Dans une première approche, nous avons regroupé tous les individus sur un même graphique et mis en relation le parcours longitudinal avec le débit moyen horaire de la Meuse repris à la station d'Amay, située au milieu du parcours.

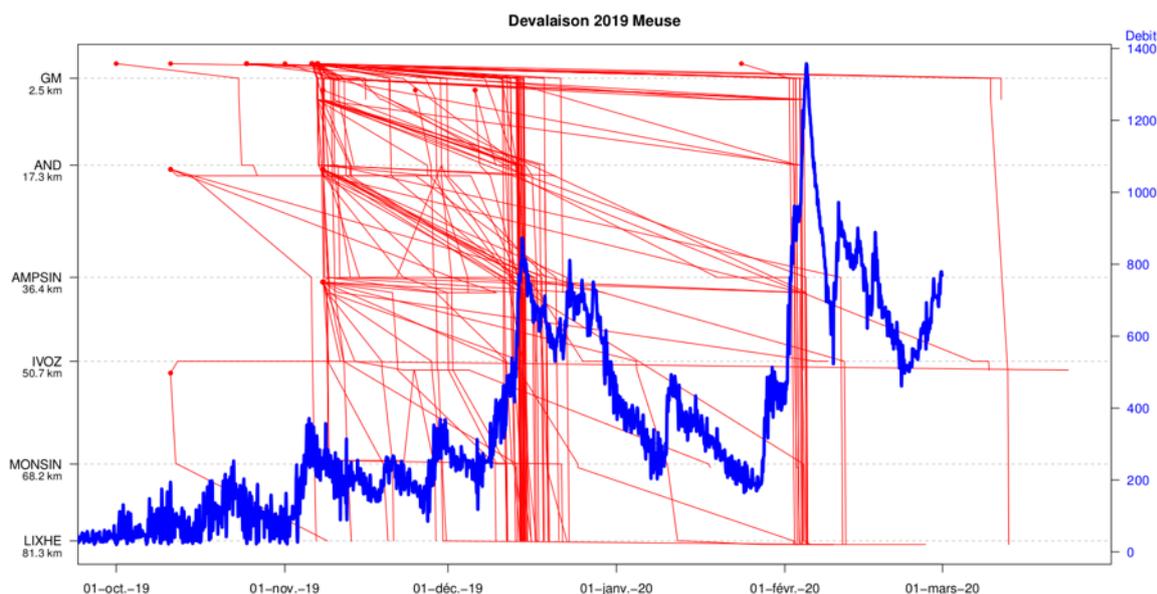


Figure 34 : Profil longitudinal des patterns de dévalaison des anguilles argentées en 2019-2020 depuis leurs lieux de déversement (points rouges) sur tout le linéaire de la Meuse wallonne mis en relation avec les débits horaires (ligne bleue, m<sup>3</sup>/s).

La Figure 34 nous permet de mettre en évidence deux concentrations importantes de mouvements sur tout le linéaire de la Meuse dans des intervalles de temps réduits. Ces phases de migrations sont observées mi-Décembre et début Février lors des deux principaux pics de débit, respectivement à 800 m<sup>3</sup>/s (14/12/2019) et à 1248 m<sup>3</sup>/s (05/02/2020). On remarque que quelques individus profitent des premières hausses de débits (250-400 m<sup>3</sup>/s) en Novembre pour entamer leur dévalaison, cependant la grande majorité des anguilles ont été marquées et remises à l'eau le 06 et 07 Novembre, soit dans la descente de ce premier pic de débit. Il est donc probable que ce premier pic de débit ait engendré une première vague de migration naturelle non documentée par nos données.

Nous retrouvons en 2019 les tendances similaires obtenues lors de l'étude de 2017 (Figure 35) où la saison avait été marquée par une première hausse de débits supérieure à 200m<sup>3</sup>/s vers la mi-novembre, ce qui avait déclenché les premières dévalaisons, suivies par 4 pics importants de débits où la quasi-totalité des sujets dévalant ont quitté la zone d'étude.

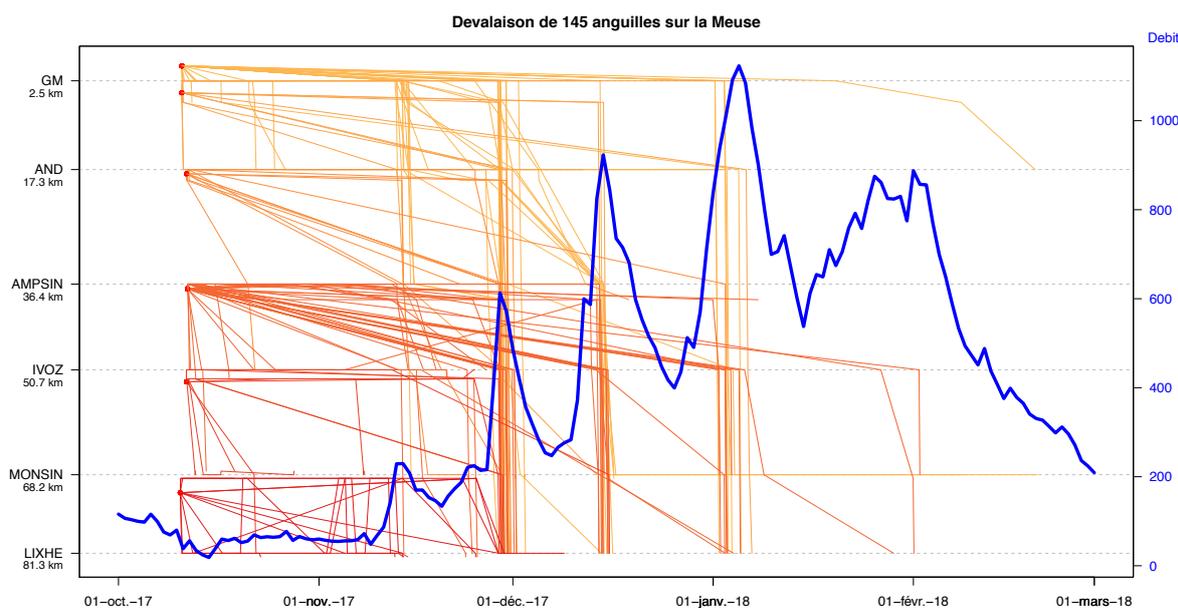


Figure 35 : Profil longitudinal des patterns de dévalaison des anguilles argentées en 2017 depuis leurs lieux de déversement (points rouges) sur tout le linéaire de la Meuse wallonne mis en relation avec les débits horaires (ligne bleue, m<sup>3</sup>/s).

#### Lot 1 :

Parmi les 98 anguilles du lot 1, 83 (85%) ont été détectées à Grands-Malades et 45 (45,9%) ont franchi Lixhe. Parmi ces individus qui ont réussi une dévalaison sur tous les sites, on note :

- Franchissements « Centrales » : 19 anguilles ont au moins 1 passage « Centrale » confirmé dont 5 individus avec 3 franchissements « Centrale ». Il y a au moins une voie de passage indéterminée sur un ou plusieurs sites pour 11 de ces anguilles.
- Franchissement « Barrage » : 12 anguilles n'ont que des passages confirmés « Barrages ». 14 anguilles ont au moins une voie de passage indéterminée sur un site, sans passage « centrale » confirmé.

En 2017, sur 49 anguilles déversées en amont de Grands-Malades, 45 y avaient été détectées (91,8%) et 17 avait complété leur migration jusqu'à Lixhe (34,7%).

#### Lot 2 :

Sur les 6 anguilles appartenant au Lot 2 dont le point de déversement est à l'aval de Grands-Malades, 5 ont été détectées à Andenne. 2 individus ont complété leur migration jusque Lixhe (40%), 1 est passé exclusivement par des barrages et l'autre a franchi 3 centrales consécutives (Ampsin, Ivoz-Ramet, Monsin). Pour les 3 autres anguilles en dévalaison, 2 anguilles ont interrompu leur dévalaison après un franchissement « Centrale » et 1 anguille après 2 barrages et 1 voie de passage indéterminée.

#### Lot 3 :

17 anguilles appartiennent au Lot 3 dont le point de déversement est à l'aval d'Andenne, 16 ont été détectées à Ampsin-Neuville ou l'ont franchi sans détection. 13 anguilles ont complété leur dévalaison jusque Lixhe (76,5%), 3 ont interrompu leur migration après le franchissement par la centrale à Ampsin-Neuville. Parmi les 13 anguilles qui sont parvenues à Lixhe :

- Franchissements « Centrale » : 6 anguilles ont au moins 1 passage « centrale » confirmé.
- Franchissements « Barrage » : 3 anguilles sont passées exclusivement par les « barrages ».
- Franchissements indéterminés : 4 anguilles ont au moins 1 voie de passage indéterminée sur un site, sans confirmation d'un passage « centrale ».

**Lot 4 :**

17 anguilles appartiennent au lot 4 dont le point de déversement est à l'aval d'Ampsin-Neuville, 15 d'entre elles ont été détectées à Ivoz-Ramet. 11 ont complété leur dévalaison jusque Lixhe (64,7%), 3 ont interrompu leur migration après le franchissement des turbines d'Ivoz-Ramet et 1 après un passage « Barrage » à Monsin. Parmi les 11 anguilles qui sont parvenues à Lixhe :

- **Franchissement « Centrale » :** 9 anguilles ont au moins un passage « Centrale » confirmé.
- **Franchissement « Indéterminé » :** 2 anguilles ont une voie de passage indéterminée sur un site et des passages par les barrages sur les autres.

**Lot 5 :**

2 anguilles ont été relâchées en aval d'Ivoz-Ramet, 1 seule a été redétectée aux barrages de Monsin et Lixhe.

La Figure 36 décrit la répartition des voies de franchissement sur l'ensemble des 6 centrales hydroélectriques en fonction des conditions hydrologiques au moment de chaque franchissement. Le ratio Débit<sub>Barrage</sub> / Débit<sub>Meuse</sub> permet d'illustrer le pourcentage du débit total de la Meuse s'écoulant par le barrage et, indirectement, la part passant par la centrale ( $1 - Q_B/Q_M$ ). Lorsque  $Q_B/Q_M = 0$ , la totalité du débit de la Meuse passe par les turbines et à l'inverse, quand  $Q_B/Q_M = 1$  les turbines sont à l'arrêt et tout l'eau passe par le barrage.

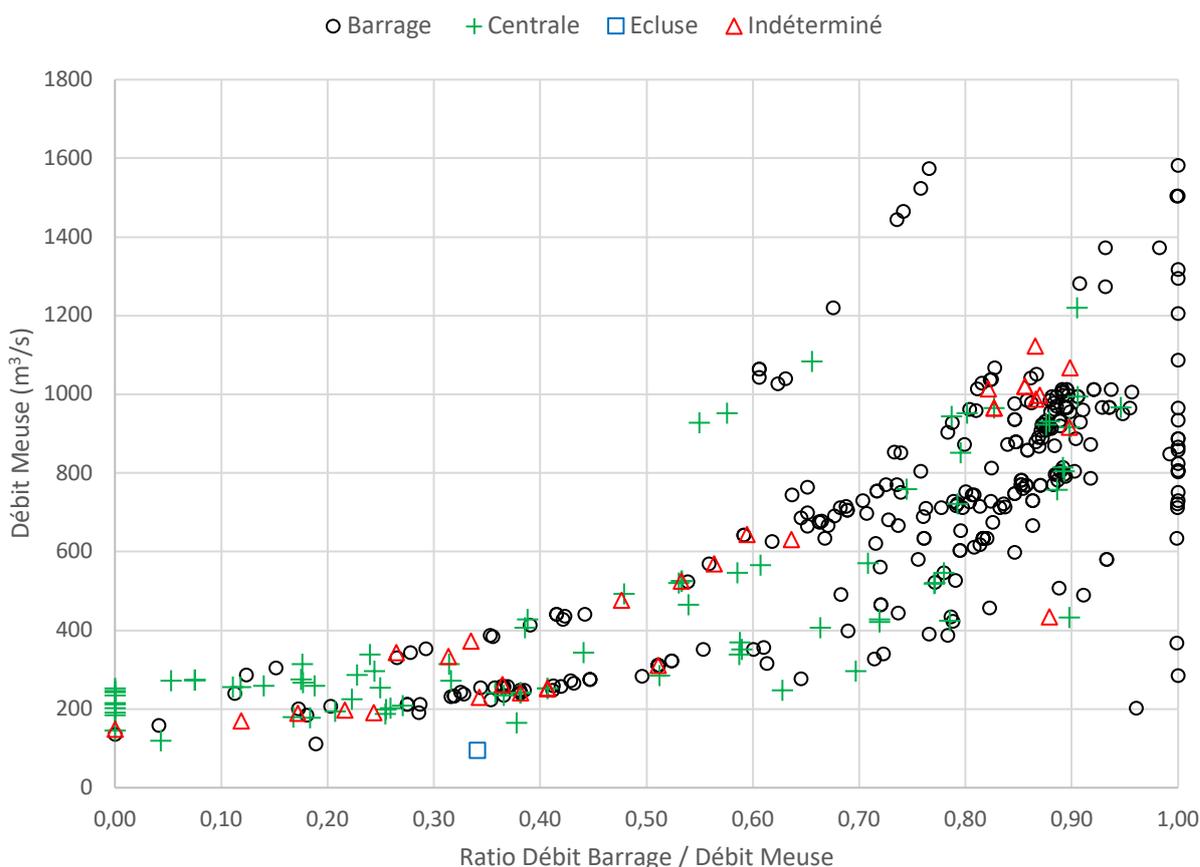


Figure 36 : Distribution des voies de passages d'anguilles argentées, tous sites confondus, en fonction du Ratio Débit Barrage / Débit Meuse et du débit de la Meuse (m³/s).

Tableau 3 : Valeurs des débits moyens et médians ( $m^3/s$ ) de la Meuse, passant par les centrales hydroélectriques ou par les barrages en fonction des différentes voies de passage des anguilles. QB / QM est sans unité.

VOIE DE PASSAGE		Q MEUSE	Q CENTRALE	Q BARRAGE	QB / QM
<b>INDETERMINEE</b>	Moyenne	551,70	170,20	381,91	0,54
	Médiane	434,71	152,52	227,39	0,51
<b>CENTRALE</b>	Moyenne	435,58	184,87	254,15	0,44
	Médiane	296,44	175,01	102,52	0,39
<b>BARRAGE</b>	Moyenne	710,23	138,39	571,96	0,73
	Médiane	744,93	123,97	601,50	0,81

Les valeurs de débits médians dans la Meuse sont significativement différentes pour les 3 catégories (K-W test,  $\chi^2 = 52,9$ ,  $df = 3$ ,  $p < .001$ ). La comparaison entre les voies de passages « Centrale » et « Barrage » a démontré que les valeurs de débits Meuse et de ratio QB/QM étaient significativement plus élevées pour la catégorie « Barrage » (Mann-Whitney tests,  $p < .001$ ). Le débit total de la Meuse peut donc jouer en faveur d'un choix d'une voie de franchissement lors d'un passage indéterminé à un ouvrage : si  $Q_{Meuse} < 300 m^3/s$  il est plus probable que l'anguille passe par la Centrale, Si  $> 750 m^3/s$  la voie de passage par le Barrage est à privilégier. Entre ces deux valeurs, une indétermination ne peut pas être levée uniquement à partir du débit total de la Meuse.

La comparaison entre le ratio QB/QM des voies de passages « Indéterminées » et « Barrages » ou « Centrales » montre une différence significative avec les « Barrages » (M-W test,  $p < .02$ ) mais ne montre pas de différence significative avec les « Centrales » ( $p = 0.145$ ). Au regard des débits de franchissement, ces tests montreraient qu'il y a une part plus importante de franchissement « Centrale » au sein des « Indéterminés ».

### 3.7 Dernières voies de franchissement avant la disparition du poisson

La dernière voie de franchissement (DVF) d'un individu est déterminée par sa voie de franchissement (« Barrage », « Centrale », « Indéterminée ») avant que le poisson ne soit ensuite plus détecté par aucune station aval dans le réseau. Les données collectées ne permettent pas de définir si une anguille n'étant plus détectée par le réseau avant son franchissement de Lixhe est morte, a stoppé sa migration ou a franchi tous les obstacles sans être détectée. Cependant, dans des cas particuliers qui seront détaillés site par site, l'étude des patterns de migration permet de privilégier l'hypothèse de la mort ou l'arrêt de migration.

#### ➤ Grands-Malades :

2 anguilles (ID 50251 et ID 61218) ayant franchi le site de Grands-Malades n'ont plus été détectées par aucune station aval. Les DVF de ces individus sont « Barrage » (ID 61218) et « Centrale » (ID 50251). Cependant, 11 anguilles ont été détectées uniquement par la station aval de Grands-Malades sans réapparaître sur d'autres stations en aval du site (Tableau 4).

Tableau 4 : Données des individus ayant franchi Grands-Malades sans être détectés par les stations des centrales aval. Les ID marqués d'un \* indiquent des vitesses de migration plus lentes que la norme et donc une forte présomption de mortalité.

ID	PASSAGE	DERNIERE DETECTION AMONT	PREMIERE DETECTION AVAL	VITESSE ANGUILE (M/S)
2248	Barrage	06/11/2019 21:37	02/02/2020 02:29	0,00003*
8797	Indéterminé	11/11/2019 00:36	02/02/2020 14:45	0,00003*
17346	Barrage	11/03/2020 18:36	11/03/2020 18:45	0,46477
25264	Centrale	10/11/2019 04:35	10/11/2019 05:09	0,11889
26816	Barrage	08/11/2019 05:26	08/11/2019 06:07	0,09795
30138	Barrage	06/11/2019 22:48	04/02/2020 08:54	0,00003*
34027	Indéterminé	09/11/2019 02:05	20/01/2020 09:13	0,00004*
35852	Centrale	01/12/2019 02:16	20/01/2020 22:28	0,00005*
50251	Centrale	07/11/2019 21:16		
52076	Centrale	29/11/2019 19:13	04/02/2020 11:26	0,00004*
58722	Indéterminé	07/11/2019 21:40	03/02/2020 05:00	0,00003*
61218	Barrage	06/11/2019 23:48		
61843	Indéterminé	15/11/2019 20:25	15/11/2019 20:40	0,27296

Il y a au total 13 individus qui n'ont pas été redétectés après la station aval de Grands-Malades (600m en aval du barrage), **5 DVF « Barrage », 4 « Centrale » et 4 « Indéterminée »**.

On remarque que 7 anguilles ont parcouru la distance CHG – Station Aval en un temps relativement long et donc à des vitesses très faibles (marquée d'un « \* »), ce qui indiquerait une mortalité directe après franchissement du site. Pour les 4 autres individus, on note une vitesse de migration qui est du même ordre de grandeur que pour les anguilles du même lot qui ont franchi au moins 2 barrages successivement, présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Profil des vitesses (m/s) des anguilles en migration sur la portion CHG- Station aval détectées sur au moins 2 sites en aval

Moyenne	Médiane	Ecart-Type	10e centile	90e centile	N
0,280	0,276	0,133	0,095	0,469	28

Ce tableau permet de confirmer que pour les 4 anguilles qui **ne sont pas marquées d'un « \* »**, leur vitesse de franchissement de la station aval correspond au profil type d'une anguille en **migration**, c'est-à-dire que leurs vitesses sont supérieures au 10<sup>e</sup> centile du pattern des vitesses. L'hypothèse de la mortalité directe liée au franchissement de CHG ne serait a priori pas retenue pour ces poissons, qui pourraient alors soit avoir été prédatés, soit avoir été mortellement blessés mais avec une capacité de nage à court terme toujours présente, soit s'être arrêtés en cours de migration.

Pour les 7 anguilles marquées d'un « \* » et considérées comme ayant subi une mortalité directe après le franchissement de CHG, on note 2 DVF « Barrage », 2 DVF « Centrale » et 3 « Indéterminée ».

La détection par la station aval des poissons morts peut s'expliquer avec les conditions environnementales : les dates de détections par la station aval (20/01 et 02/02/2020) correspondent à des périodes de hausses importantes du débit de la Meuse, les tags ou les corps des anguilles reposant au pied du barrage ont pu alors être emportés par le courant sur quelques centaines de mètres et passer à proximité de la station aval.

L'utilisation de la technologie acoustique mobile, actuellement en cours de développement par Profish, au niveau de l'aval immédiat du barrage de Grands-Malades a permis de retrouver 2 tags d'anguilles ayant stoppé leur migration :

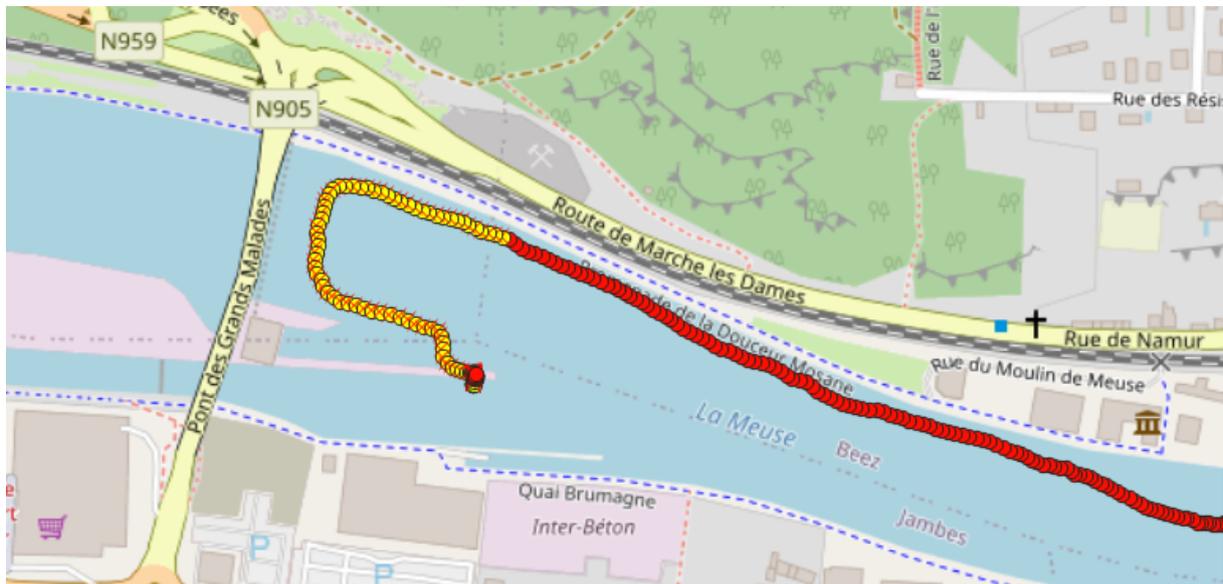


Figure 37 : Zone de détection de la tag 50251 au cours du pistage mobile. En jaune les positions du bateau où le tag a été détecté et en rouge les positions du bateau sans détection.

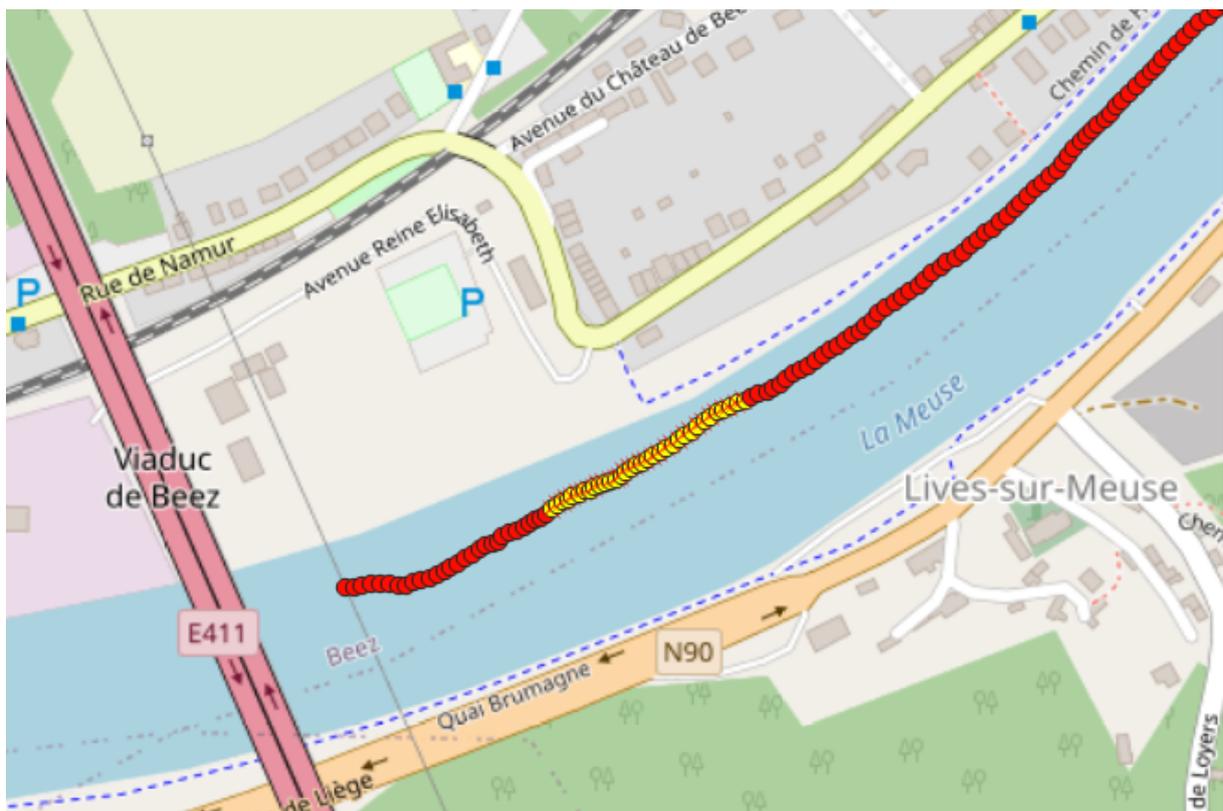


Figure 38 : Zone de détection de la tag 35852 au cours du pistage mobile. 1500m en aval du barrage de Grands-Malades. En jaune les points GPS où le tag a été détecté et en rouge les points GPS sans détection.

Ces données acquises le 30/06/2020, permettent de valider l'hypothèse pour l'ID 35852 du tag emporté par le courant lors des crues car retrouvée 1km après la station aval. Les données concernant l'ID 50251 ne permettent pas de localiser précisément le tag du côté Centrale ou Barrage mais confirme que l'individu a subi une mortalité directe lors du franchissement de l'ouvrage.

➤ Andenne :

Au total, 13 anguilles ont franchi CHA sans être détectées par les stations des centrales en aval sur toute la période de l'étude. On comptabilise **11 DVF « Barrage », 1 « Centrale », 1 « Ecluse » et 0 « Indéterminée »**. Parmi ces 13 individus, 9 ont été redétectés par la station située à 1 800m en aval d'Andenne, 4 anguilles n'ont plus jamais été détectées après leur franchissement d'Andenne (Tableau 6).

Tableau 6 : Données des individus ayant franchi Andenne sans être détectés par les stations des centrales aval. Les ID marqués d'un \* indiquent des vitesses de migration plus lentes que la norme et donc une forte présomption de mortalité.

ID	PASSAGE	DERNIERE DETECTION		VITESSE ANGUILE (M/S)
		AMONT	AVAL	
1935	Ecluse	26/10/2019 06:27	26/10/2019 22:46	0,032
4155	Barrage	08/11/2019 02:33		
4475	Barrage	07/11/2019 05:33	27/11/2019 17:45	0,001*
11300	Barrage	08/11/2019 04:31	15/12/2019 03:52	0,001*
11613	Barrage	13/11/2019 03:56	13/11/2019 04:52	0,558
22091	Barrage	13/11/2019 17:35		
26835	Barrage	14/12/2019 01:51	14/12/2019 03:07	0,409
34751	Barrage	07/11/2019 05:10	08/11/2019 01:15	0,026*
36036	Centrale	09/12/2019 19:01		
48864	Barrage	13/12/2019 20:51	13/12/2019 22:33	0,306
56136	Barrage	14/12/2019 12:07	14/12/2019 14:00	0,275
57066	Barrage	07/11/2019 04:51	20/12/2019 19:27	0,000*
65342	Barrage	03/02/2020 09:49		

Le Tableau 7 ci-dessous présente les vitesses de nage des anguilles du même lot qui ont franchi plus de 2 sites.

Tableau 7 : Profil des vitesses (m/s) des anguilles en migration sur la portion CHA - Station aval

Moyenne	Médiane	Ecart-Type	10e centile	90e centile	N
0,98	1,02	0,36	0,23	1,44	36

Ce tableau permet de confirmer que pour les 5 anguilles **qui ne sont pas marquées d'un \***, leur vitesse de franchissement de la station aval correspond au profil type d'une anguille en migration. Comme précédemment, ces poissons n'ont probablement pas subi de mortalité directe liée au franchissement, mais plus probablement une mortalité différée, une prédation ou encore un arrêt de migration.

Pour les 4 anguilles marquées d'un \*, l'hypothèse de la mortalité directe et le franchissement de la station aval grâce aux forts courants est moins plausible qu'à Grands-Malades du fait que la station aval se situe 3 fois plus loin à Andenne et que pour l'ID 4475, au moment de la détection par la station aval, le débit est inférieur à 200 m<sup>3</sup>/s. Un phénomène de prédation ou un déplacement vers un habitat provisoire avant une prochaine migration, pourraient expliquer la détection de la tag 20 jours après le franchissement du barrage par l'anguille. Pour les ID 11300 et ID 57066, les débits moyens journaliers étaient respectivement 774 m<sup>3</sup>/s et 571m<sup>3</sup>/s.

➤ Ampsin-Neuville :

Au total, 9 anguilles ont franchi CHN sans être détectées par les stations des centrales en aval sur toute la période de l'étude. On comptabilise **3 DVF « Barrage », 6 « Centrale », 0 « Ecluse » et 0 « Indéterminée »**. Parmi ces 9 individus, 8 ont été redétectés par la station située 3 km en aval d'Ampsin, 1 seule n'a jamais été redétectée après son franchissement d'Ampsin-Neuville (Tableau 8).

*Tableau 8 : Données des individus ayant franchi Ampsin-Neuville sans être détectés par les stations des centrales aval. Les ID marqués d'un \* indiquent des vitesses de migration plus lentes que la norme et donc une forte présomption de mortalité.*

ID	PASSAGE	DERNIERE DETECTION		VITESSE ANGUILE
		AMONT	AVAL	
5833	Centrale	04/12/2019 15:29	04/12/2019 17:20	0,451
7854	Centrale	08/11/2019 21:47	09/11/2019 04:48	0,119
18697	Barrage	01/02/2020 15:03		
19503	Barrage	13/12/2019 10:50	29/12/2019 18:41	0,002*
21000	Barrage	22/12/2019 03:03	22/12/2019 04:18	0,667
29931	Centrale	08/11/2019 21:13	24/12/2019 13:19	0,001*
34869	Centrale	28/11/2019 08:40	04/02/2020 22:01	0,001*
46343	Centrale	08/11/2019 21:41	29/11/2019 15:17	0,002*
59020	Centrale	01/12/2019 18:08	09/12/2019 21:50	0,004*

*Tableau 9 : Profil des vitesses (m/s) des anguilles en migration sur la portion CHN- Station aval*

Moyenne	Médiane	Ecart-Type	10e Centile	90e Centile	N
1,207	1,354	0,369	0,581	1,664	46

Les 3 anguilles sans « \* » ont une vitesse de déplacement entre le barrage et la station aval relativement lente, proche du 10<sup>e</sup> centile des vitesses des anguilles ayant parcouru cette portion de Meuse, mais encore trop élevée pour pouvoir conclure à une mortalité directe de l'ouvrage. Une nage passive, dont la vitesse est inférieure à la vitesse du courant, d'une anguille en migration peut être expliquée par un temps de latence dû à un étourdissement ou une blessure lors du franchissement de l'ouvrage.

Les 5 anguilles marquées d'un « \* » ont des vitesses bien trop faibles pour être considérées comme étant en migration après le franchissement d'Ampsin-Neuville mais les conditions environnementales et la distance importante (3 km) entre le barrage et la station aval ne permettent pas de valider l'hypothèse du transport des corps ou des tags de manière passive par le courant jusqu'à la station aval. La prédation reste plausible mais ne peut être validée par le jeu de données actuel, une recherche par pistage mobile pourra apporter d'avantages d'informations sur le devenir de ces individus.

➤ Ivoz- Ramet :

Au total, 11 anguilles ont franchi CHR sans être détectées par les stations des centrales en aval sur toute la période de l'étude. On comptabilise **4 DVF « Barrage », 7 « Centrale », 0 « Ecluse » et 0 « Indéterminée »**. Parmi ces 11 individus, 3 ont été redétectés par la station située 1600 m en aval d'Ivoz-Ramet, 8 n'ont jamais été redétectées après son franchissement de CHR (Tableau 10).

Tableau 10 : Données des individus ayant franchi Ivoz-Ramet sans être détectés par les stations des centrales aval. Les ID marqués d'un \* indiquent des vitesses de migration plus lentes que la norme et donc une forte présomption de mortalité.

ID	PASSAGE	DERNIERE DETECTION AMONT	PREMIERE DETECTION AVAL	VITESSE ANGUILE
2485	Centrale	08/11/2019 23:27		
8761	Centrale	09/03/2020 11:47	09/03/2020 14:24	0,165
9032	Barrage	15/12/2019 01:36		
19050	Centrale	15/12/2019 05:21		
21745	Barrage	17/12/2019 05:24		
25020	Centrale	11/11/2019 04:59		
27991	Centrale	14/12/2019 10:21		
47397	Barrage	04/02/2020 07:45	04/02/2020 08:03	1,424
47688	Barrage	15/12/2019 03:00	15/12/2019 08:24	0,080
52134	Centrale	30/12/2019 14:09		
60058	Centrale	09/11/2019 00:53		

Tableau 11 : Profil des vitesses (m/s) des anguilles en migration sur la portion CHR- Station aval.

Moyenne	Médiane	Ecart-type	10e Centile	90e Centile	N
0,881	0,955	0,311	0,291	1,319	36

Parmi les 3 anguilles redétectées à la station aval, l'ID 47397 a une vitesse de nage correspondant au profil type des vitesses des anguilles en migration sur ce tronçon de Meuse. On peut supposer qu'elle a franchi la station aval en nage active et a stoppé sa migration plus loin dans le bief. Les 2 autres anguilles redétectées (ID 8761 et 47688) ont des vitesses de nage entre le barrage et la station aval inférieures au 10<sup>e</sup> centile du profil de vitesse moyen des anguilles en migration. Pour l'ID 47688, on peut émettre l'hypothèse d'un étourdissement ou d'une blessure après franchissement de l'ouvrage qui retarde le passage à la station aval. Lors du passage tardif de l'anguille ID 8761 (09/03/2020), le réseau de la station aval, de Monsin et de Lixhe n'était plus pleinement opérationnel, on ne peut donc pas écarter un franchissement de l'anguille non enregistré.

➤ Monsin :

Une seule anguille ayant franchi Monsin n'a pas été redétectée à Lixhe. Le débit sur le barrage lors du franchissement était de l'ordre de 1000m<sup>3</sup>/s et l'anguille a mis 8h00 pour parcourir les 550m qui sépare le barrage de la station aval.

L'hypothèse de la mortalité directe après le franchissement du barrage et le transport passif du corps jusqu'à la station aval par le courant est plausible dans ce cas de figure (Tableau 12 et Tableau 13).

Tableau 12 : Données des individus ayant franchi Monsin sans être détectés par les stations des centrales aval. Les ID marqués d'un \* indiquent des vitesses de migration plus lentes que la norme et donc une forte présomption de mortalité.

ID	PASSAGE	DERNIERE DETECTION AMONT	PREMIERE DETECTION AVAL	VITESSE ANGUILE
16124	Barrage	17/01/2020 22:34	18/01/2020 06:34	0,019*

Tableau 13 : Profil des vitesses (m/s) des anguilles en migration sur la portion CHM- Station aval

Moyenne	Médiane	Ecart-type	10e Centile	90e Centile	N
0,725	0,503	0,460	0,0488	1,360	20

➤ Lixhe

La station aval de Lixhe n'ayant pas été pleinement opérationnelle durant l'étude, seules 17 anguilles ont pu être détectées à la station sur les 63 individus détectés au barrage, nous ne pouvons pas conclure sur le devenir des individus après franchissement de l'ouvrage.

Tableau 14 : Profil des vitesses (m/s) des 17 anguilles en migration sur la portion CHL - Station aval

Moyenne	Médiane	Ecart-type	10e Centile	90e Centile	N
1,203	1,617	0,814	0,017	2,188	16

➤ Synthèse

Au total, 47 anguilles sont mortes ou ont stoppé leur migration après le franchissement d'une centrale hydroélectrique ou une écluse, sans considérer le barrage-centrale de Lixhe. Pour ces individus, les proportions des dernières voies de franchissement avant disparition de l'anguille sont reprises dans la Figure 39.

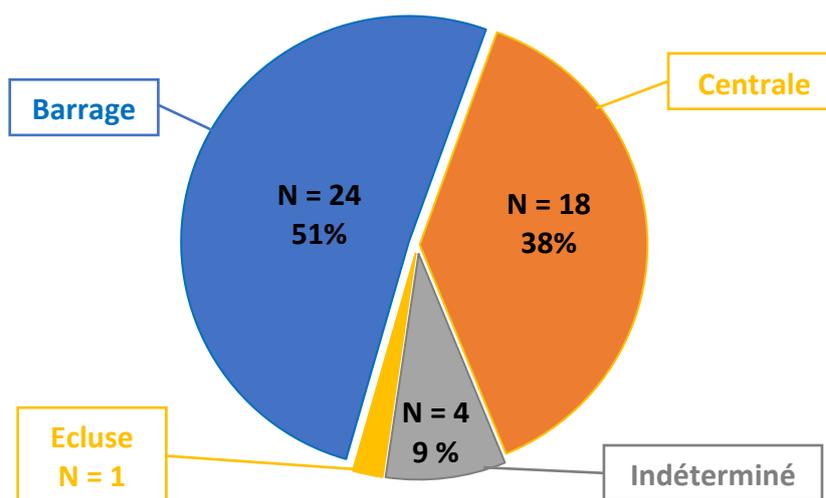


Figure 39 : Proportions des dernières voies de franchissement « Barrage », « Centrale », « Ecluse », « Indéterminé » sur avant disparition du réseau de 5 centrales hydroélectriques (hors Lixhe) sur la Meuse (N = 47).

En comparaison des proportions des dernières voies de franchissement (DVF) des anguilles ayant disparu du réseau après le franchissement d'un ouvrage, la répartition reste similaire entre les données observées en 2017 et en 2019 (Tableau 15). En rapportant le nombre de franchissements ayant causé une interruption de migration au nombre total de franchissement de l'étude (Total Voies de Franchissement : VF), on obtient un **ratio** décrivant le pourcentage des franchissements causant un arrêt de migration pour chaque voie de passage.

Les DVF de Lixhe n'étant pas disponibles, le nombre de franchissements observés sur ce site n'ont pas été pris en compte dans les calculs de 2019 et 2017.

Tableau 15 : Tableau comparatif de la répartition des voies de franchissement entre 2017 et 2019 et du ratio DVF / Total DVF.

	2019	BARRAGE	CENTRALE	INDETERMINE	ECLUSE	N TOTAL
<b>DVF</b>		24	18	4	1	47
<b>TOTAL VF</b>		243	83	66	1	393
<b>RATIO</b>		9,9%	21,7%	6,1%	100,0%	
	<b>2017</b>					
<b>DVF</b>		20	6	10	2	38
<b>TOTAL VF</b>		191	58	56	2	307
<b>RATIO</b>		10,5%	10,3%	17,9%	100,0%	

Ces données tendent donc à indiquer que la voie de franchissement par le barrage n'est pas une voie à considérer sans risque pour les anguilles en migration. Il apparaît important d'essayer de mieux comprendre les causes de disparition après le passage d'un barrage, car c'est la voie qui est privilégiée dans les mesures de gestion considérées pour les anguilles.

### 3.8 Temps de progression et vitesse de nage entre les sites

Le Tableau 16 montre les différents temps de parcours et vitesses atteintes par les anguilles en migration (franchissement d'au moins 2 sites) entre la station aval d'un site et la station amont du site suivant. Les vitesses des anguilles sont mises en relation avec les vitesses du courant. Celles-ci sont calculées au moment de la détection des individus à partir des débits et d'une section théorique du bief : largeur moyenne calculée à partir de 5 mesures sur Google Earth et profondeur estimée à 3,4m sur toute la Meuse (*Sofico*). Les faibles valeurs observées sur le bief amont de Grands-Malades proviennent du fait que l'on ne possède pas les dates et heures exactes des départs en migration, les vitesses sont calculées à partir du temps entre leur déversement et leur arrivée à la station amont de Grands-Malades. De la même manière, les individus qui n'ont pas dévalé immédiatement ou qui ont interrompu momentanément leur migration auront des vitesses très faibles dans les biefs concernés.

Tableau 16 : Composantes des temps de parcours et des vitesses des anguilles en migration et du courant sur les différents biefs.

	AMONT CHG	CHG – CHA	CHA – CHN	CHN – CHR	CHR – CHM	CHM – CHL
<b>DISTANCE (M)</b>	8838	14138	17363	11314	15998	12546
<b>MIN TEMPS PARCOURT (H)</b>	1:30:26	2:28:29	2:53:42	1:25:18	2:30:32	1:57:00
<b>MAX TEMPS PARCOURT (H)</b>	3605:30:42	2138:24:55	1686:07:00	9637:00:11	430:22:34	952:07:43
<b>MÉDIANE TEMPS PARCOURT</b>	416:00:57	58:49:27	6:06:40	2:43:56	4:36:24	6:44:13
<b>V MÉDIANE COURANT (M/S)</b>	0,65	0,78	1,51	1,57	1,48	1,10
<b>V MIN ANGUILLES (M/S)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
<b>V MAX ANGUILLES (M/S)</b>	1,63	1,59	1,67	2,21	1,77	1,79
<b>V MÉDIANE ANGUILLES (M/S)</b>	0,01	0,07	0,79	1,15	0,97	0,52
<b>V ANGUILE / V COURANT</b>	1%	9%	52%	73%	65%	47%

La Figure 40 met en relation les vitesses des anguilles avec la vitesse du courant sur chacun des biefs au moment de la détection des individus. La courbe bleue correspond à la situation d'une vitesse théorique de nage égale à la vitesse du courant. Les points supérieurs à cette courbe se traduisent par une nage active, c'est-à-dire que l'anguille se déplace plus vite que le courant, et les points inférieurs à cette courbe correspondent à une nage passive où les anguilles se laissent porter par le courant.

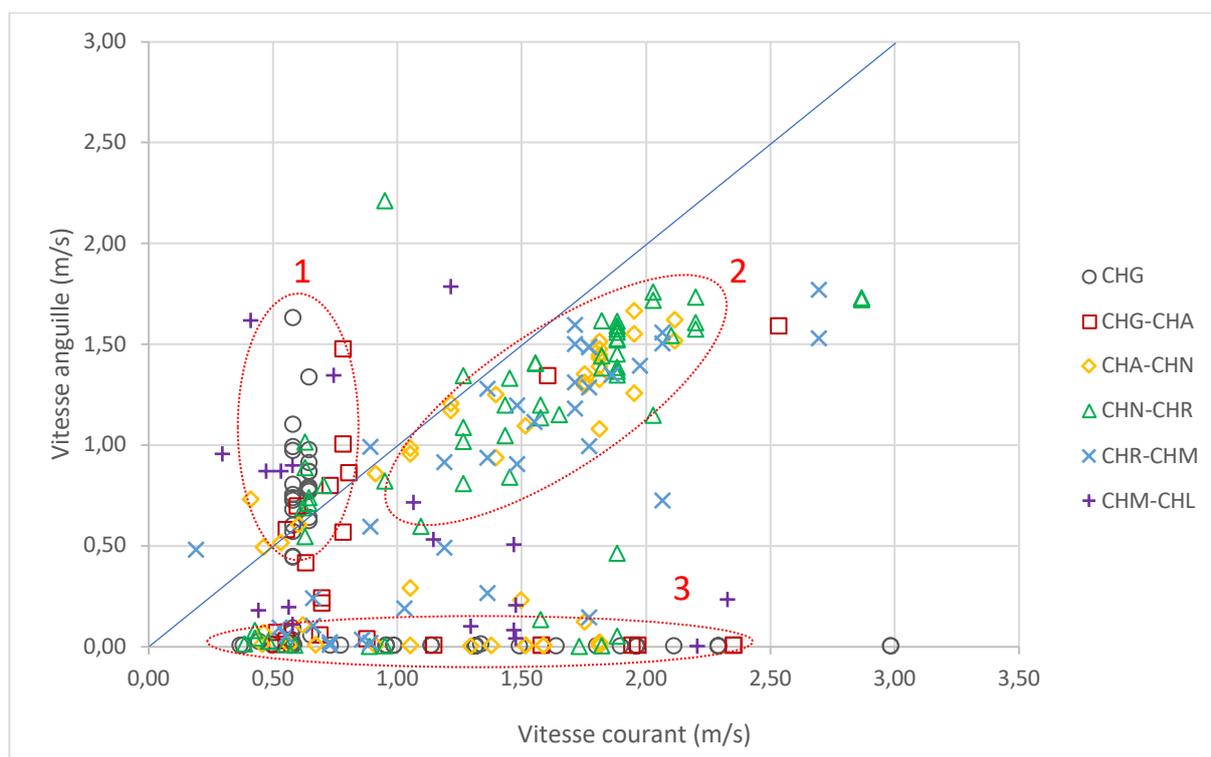


Figure 40 : Ensemble des vitesses des anguilles (m/s) calculées sur chacun des biefs en fonction des vitesses du courant (m/s) au moment de la détection des individus. Équation de la courbe bleue :  $y = x$ .

On peut distinguer 3 tendances où se concentrent les points, délimitées par les zones en pointillés rouges :

- Zone 1 : Ensemble d'individus ayant des vitesses enregistrées sur tous les biefs qui progressent plus vite que le courant lorsque celui-ci à une vitesse faible. Lors de la dévalaison et dans des conditions de vitesses de courant faibles, ces résultats tendent à montrer que les anguilles adoptent une nage active.
- Zone 2 : Ensemble d'individus ayant des vitesses enregistrées, principalement après Andenne et jusque Monsin. Lorsque les vitesses du courant augmentent, les individus dévalant tendent à adopter un comportement de nage passif en se maintenant à une vitesse proche de celle du courant.
- Zone 3 : Ensemble des individus affichant une vitesse très faible dans tous les biefs. Ces données sont difficilement interprétables, cependant les individus ont probablement interrompu momentanément leur dévalaison dans un bief pour attendre des conditions plus favorables. Ces interruptions ont allongé la migration dans le temps et réduit fortement la vitesse moyenne des individus dans les biefs.

### 3.9 Répartition nycthémerale des franchissements

Pour la répartition nycthémerale des franchissements nous nous basons sur l'heure de la dernière détection en amont de l'obstacle. Les horaires de lever et coucher du Soleil sont calculés grâce au site de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE) en UTC sur la période du 01/10/2019 au 01/03/2020. Chaque date et heure de franchissement ont été comparées aux dates et heures des éphémérides correspondantes pour déterminer le passage de l'anguille comme étant de jour ou de nuit.

#### 3.9.1 Grands-Malades

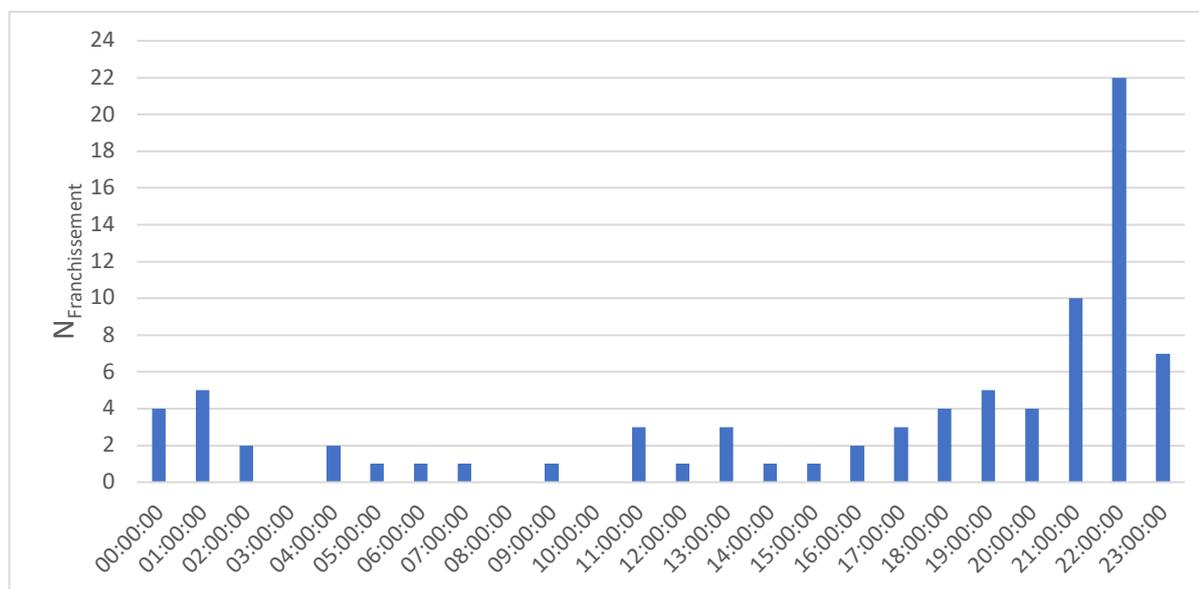


Figure 41 : Répartition des franchissements du site de Grands-Malades en fonction des heures de la journée

Sur le site de Grands-Malades, 72 anguilles ont franchi le site de nuit (86,7%) et 11 anguilles de jour (13,3%, N<sub>Total</sub> = 83). 29 anguilles ont franchi CHG moins de 24h après leur déversement, on ne peut donc exclure une influence de l'heure de déversement pour ces individus.

### 3.9.2 Andenne

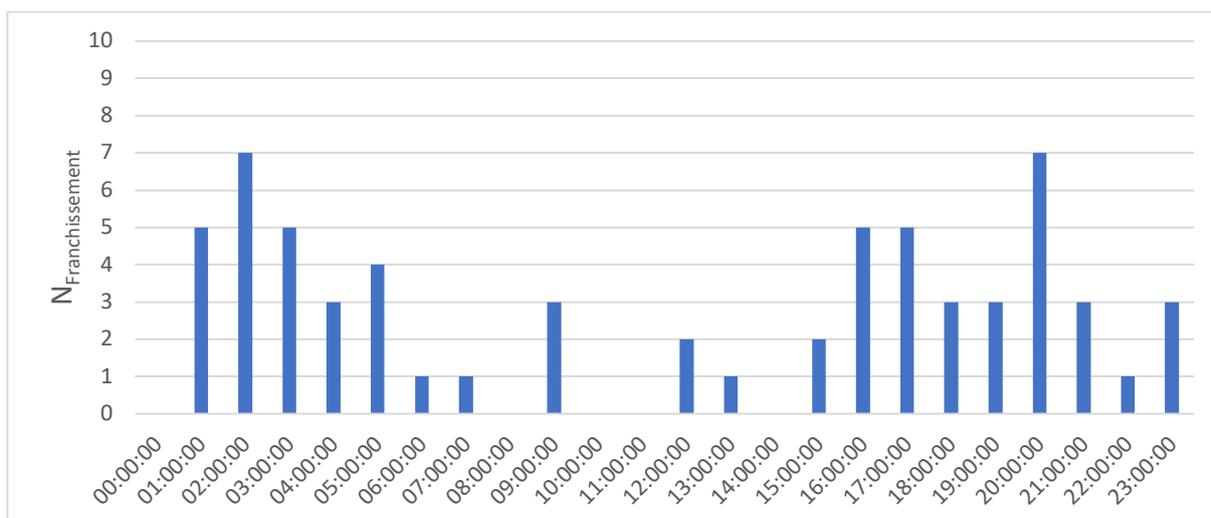


Figure 42 : Répartition nycthémerale des franchissements du site d'Andenne

Sur le site d'Andenne, 56 anguilles ont franchi le site de nuit (87,5%) et 8 anguilles de jour (12,5%). L'heure de franchissement n'est pas disponible pour 11 individus (14,7 %, N<sub>Total</sub> = 75). Parmi les 5 anguilles déversées dans le Lot 2 et ayant franchi le site, 1 individu est passé moins de 24h après son déversement avec un délai de 9h40.

### 3.9.3 Ampsin-Neuville

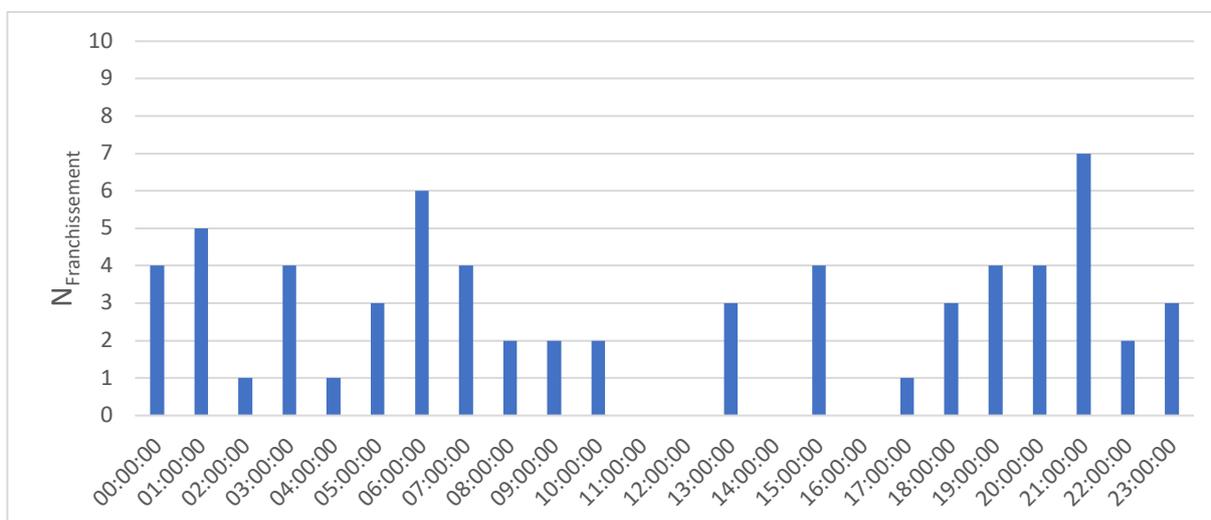


Figure 43 : Répartition nycthémerale des franchissements du site d'Ampsin-Neuville

Sur le site d'Ampsin-Neuville, 51 anguilles ont franchi le site de nuit (65,4%), 14 anguilles de jour (17,9%) et l'heure de franchissement n'est pas disponible pour 13 individus (16,7 %, N<sub>Total</sub> = 78). Parmi les 16 anguilles déversées dans le Lot 3 et ayant franchi le site, 3 individus sont passés moins de 24h après leur remise à l'eau (délais : 3h23, 3h53 et 9h27) qui a eu lieu à 17:50:00.

### 3.9.4 Ivoz-Ramet

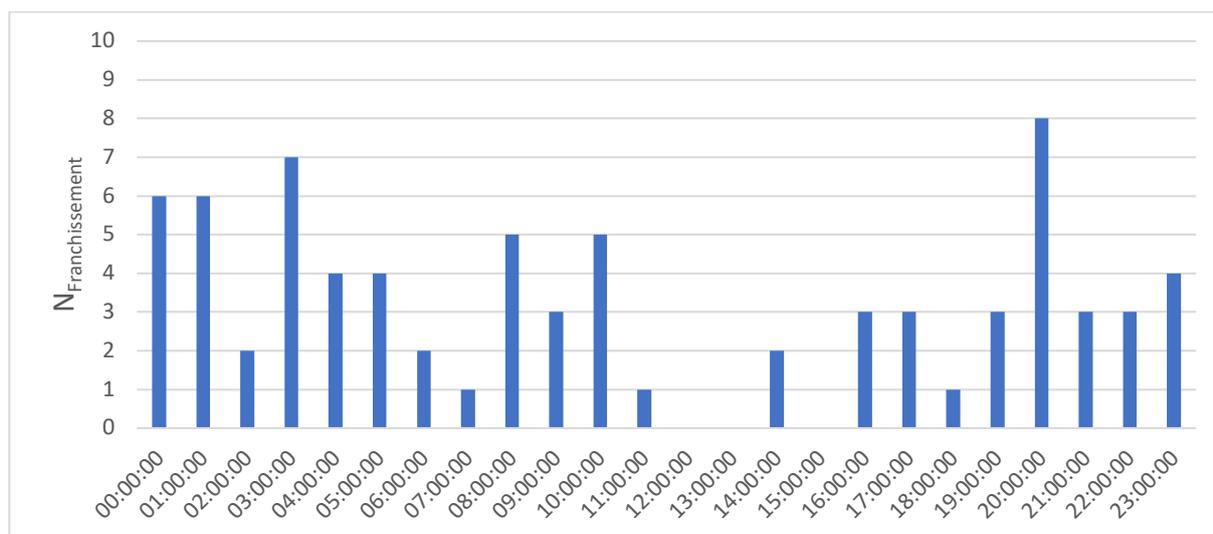


Figure 44 : Répartition nyctémérale des franchissements du site d'Ivoz-Ramet

Sur le site d'Ivoz-Ramet, 60 anguilles ont franchi le site de nuit (71,4%), 16 anguilles de jour (19%) et l'heure de franchissement n'est pas disponible pour 8 individus (9,5%,  $N_{\text{Total}} = 84$ ). Parmi les 14 anguilles déversées dans le Lot 4 et ayant franchi le site, 5 individus sont passés moins de 24h après leur remise à l'eau (délais compris entre 3h10 et 6h47) qui a eu lieu à 16:40:00.

### 3.9.5 Monsin

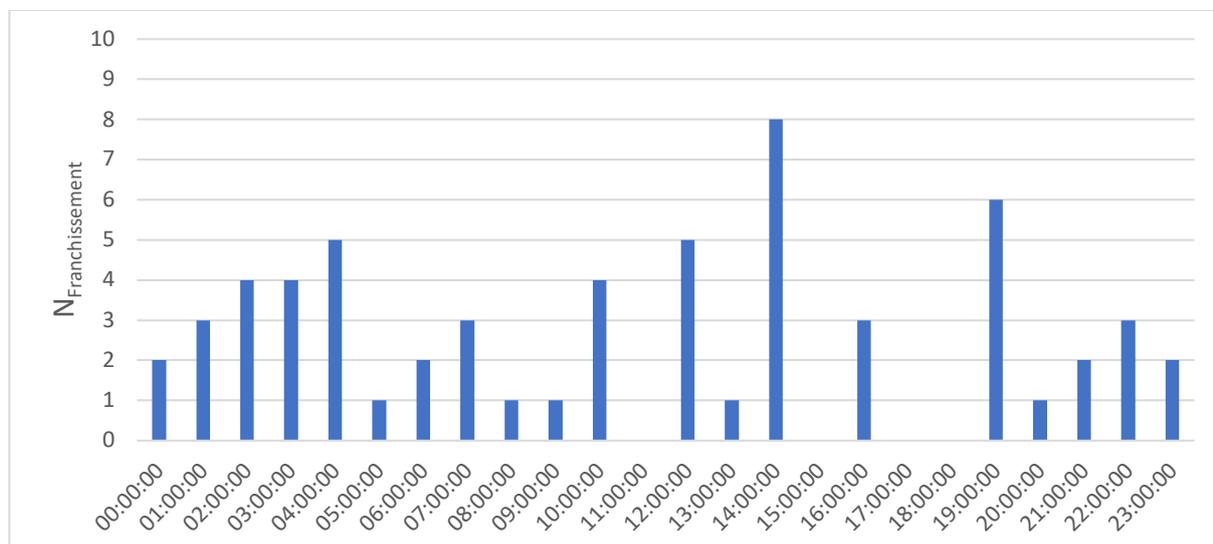


Figure 45 : Répartition nyctémérale des franchissements du site de Monsin

Sur le site de Monsin, 41 anguilles ont franchi le site de nuit (56,2%), 20 anguilles de jour (27,4%) et l'heure de franchissement n'est pas disponible pour 12 individus (16,4%,  $N_{\text{Total}} = 73$ ). Parmi les 2 anguilles déversées dans le Lot 5 et ayant franchi le site, aucune n'est passée moins de 24h après leur remise à l'eau.

### 3.9.6 Lixhe

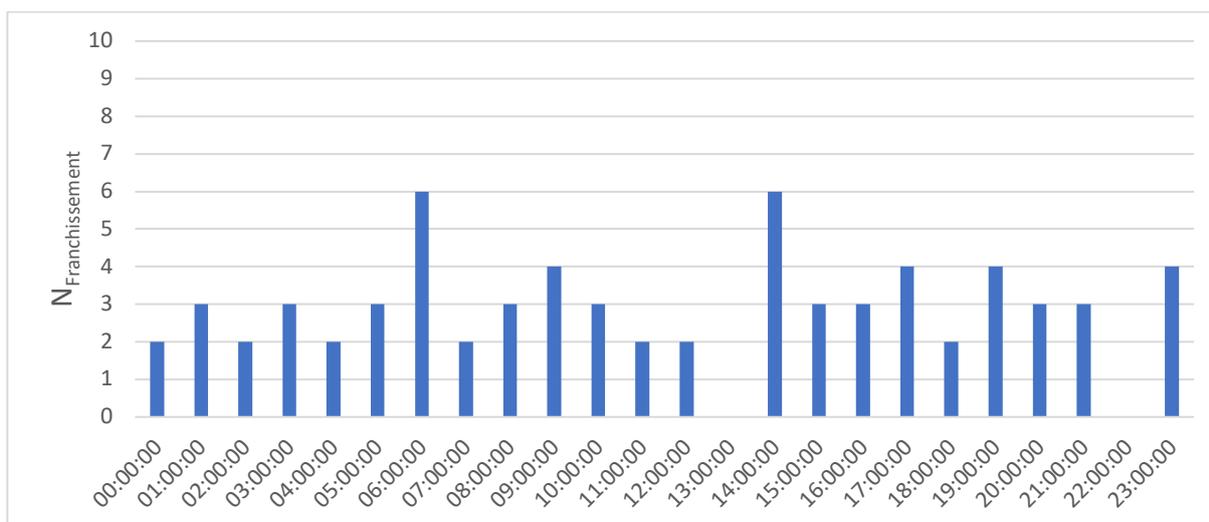


Figure 46 : Répartition nycthémerale des franchissements du site de Lixhe

Sur le site de Lixhe, 43 anguilles ont franchi le site de nuit (59,7%), 26 anguilles de jour (36,1%) et l'heure de franchissement n'est pas disponible pour 3 individus (4,2%,  $N_{Total} = 72$ ).

### 3.9.7 Analyses générales

Ce paragraphe compile les heures de franchissements sur l'ensemble des individus et des sites.

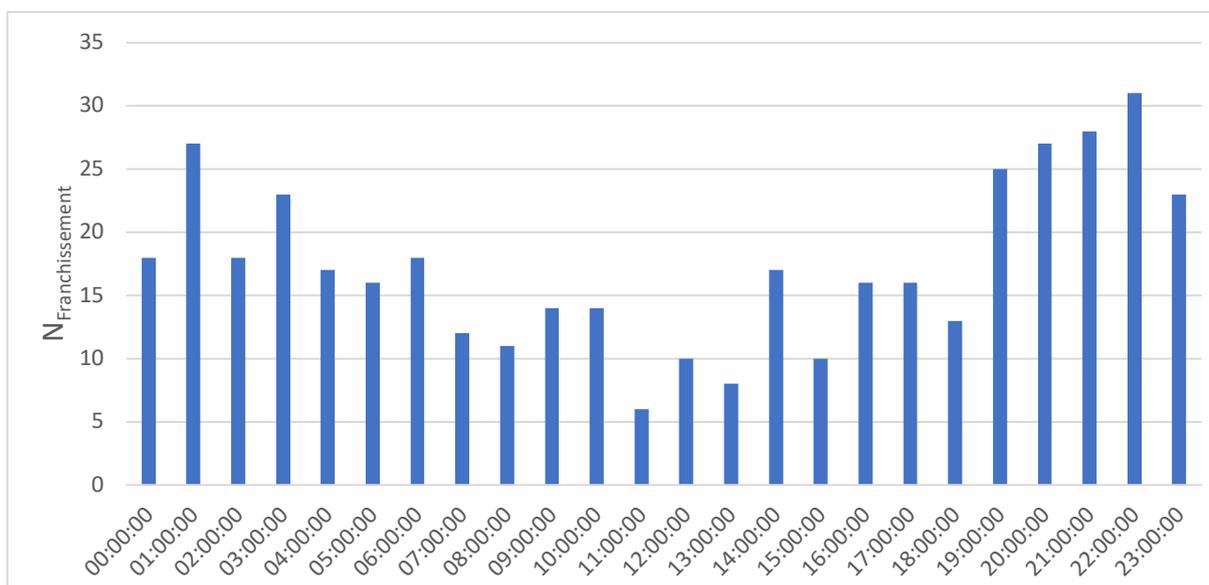


Figure 47 : Répartition nycthémerale des franchissements de l'ensemble des 6 centrales hydroélectriques.

465 franchissements ont été enregistrés sur l'ensemble des 6 centrales hydroélectriques. 323 (69,5%) ont eu lieu de nuit et 95 (20,4%) de jour, l'heure du franchissement n'est pas disponible pour 47 passages (10,1%). On remarque qu'au fur et à mesure que l'on avance dans le linéaire de la zone d'étude, le ratio des pourcentages de franchissements Jour/Nuit tend à augmenter (Tableau 17).

Tableau 17 : pourcentage des franchissements et ratio Jour/Nuit des franchissements d'anguilles sur les 6 sites successifs.

FRANCHISSEMENTS	JOUR	NUIT	RATIO
<b>GRANDS-MALADES</b>	13,3%	86,7%	0,15
<b>ANDENNE</b>	10,7%	74,7%	0,14
<b>AMPSIN</b>	17,9%	65,4%	0,27
<b>IVOZ-RAMET</b>	19,0%	71,4%	0,36
<b>MONSIN</b>	27,4%	56,2%	0,49
<b>LIXHE</b>	36,1%	59,7%	0,60

Plusieurs facteurs peuvent expliquer que les anguilles s'exposent plus à la lumière du jour au fur et à mesure de leur avancée sur le linéaire de la Meuse. S'il l'on considère l'ensemble des franchissements dont on dispose des heures aux ouvrages et que l'on élimine ceux pouvant être influencés par un effet de déversement (N=384), les franchissements lors du premier pic de débit en représentent 44,0% (N=169) contre 13,3% pour le second pic de débit (N=51). Le premier facteur pouvant être impliqué est la turbidité de l'eau, importante pendant les crues en Meuse, qui peut inhiber le comportement de fuite face à la lumière. La répartition des franchissements pendant les pics de débit est de 34% de Jour / 66% de Nuit pour le premier et 35% de Jour / 65% de Nuit pour le second contre 26% de Jour / 74% de Nuit hors période de crues. La turbidité accrue au moment des pics de débit ne peut pas à elle seule expliquer la variation du ratio Jour/Nuit le long du linéaire de la Meuse. Le second facteur pouvant intervenir est le temps de parcours des anguilles depuis leur premier franchissement jusque Lixhe lors des crues, 22 anguilles (Lot 1 : N=17, Lot 2 : N=1, Lot 3 : N=2, Lot 4 : N=2, Lot 5 : N=0) ont démarré leur migration lors du premier pic de débit et 21 sont parvenues jusque Lixhe, le temps médian de parcours est de 15h59. 6 anguilles ont mis plus de 24h à parcourir la distance qui les séparait de Lixhe, dont 1 qui a interrompu sa migration lors de la première crue pour la reprendre lors de la seconde (temps de parcours : 1250h). Sur ces 22 individus : 17 sont partis de nuit et 5 de jour, 10 ont franchi Lixhe de nuit et 11 de jour.

Dans le cas des anguilles du lot 1 qui sont les plus nombreuses et celles qui ont parcouru la plus grande distance, le temps médian de parcours est de 16h53. 13 individus ont démarré de nuit et 4 de jour à Grands-Malades, tandis qu'ils ont été 6 à franchir Lixhe de nuit et 10 de jour.

### 3.10 Observations comportementales par les données spatialisées (2D)

Les réseaux télémétriques déployés à Grands-Malades et Ivoz-Ramet au droit des barrières comportementales ont permis de générer des positions géolocalisées pour une partie des individus détectés sur ces deux sites.

Tableau 18 : quantification des données spatialisées obtenues sur les deux sites équipés d'un réseau télémétrique 2D.  
CHG = Centrale Hydroélectrique Grands-Malades ; CHR = Centrale Hydroélectrique Ivoz-Ramet.

	CHG	CHR
<b>NOMBRE TOTAL D'INDIVIDUS SPATIALISES</b>	49	34
<b>NOMBRE TOTAL DE POSITIONS SPATIALISEES</b>	332	237
<b>NOMBRE MIN DE POINT/POISSON</b>	1	1
<b>NOMBRE MEDIAN DE POINTS/POISSONS</b>	3	3
<b>NOMBRE MAX DE POINTS/POISSON</b>	138	93

La proportion d'anguilles détectées pour lesquelles une trajectoire est exploitable au niveau comportemental est assez faible, une majorité des anguilles ayant franchi les sites endéans des délais très courts sous des conditions de débits assez élevés, deux conditions qui n'ont pas permis au réseau d'hydrophone d'acquérir suffisamment de données pour régénérer systématiquement des trajectoires précises.

L'analyse comportementale sur ces deux sites est en lien avec la mesure d'efficacité des barrières qui y sont déployées : barrière électrique à Grands-Malades et barrière à bulles à Ivoz-Ramet. Un rapport étant dédié à la mesure de l'efficacité de ces barrières, l'analyse comportementale y est décrite plus abondamment.

## 4 DISCUSSION

### 4.1 *Durée de vie des équipements et fiabilité des données*

Au cours du suivi, nous avons observé a posteriori que des hydrophones s'étaient arrêtés plus précocement que normalement prévu par la durée de vie théorique des batteries (200 jours). Ces arrêts concernent des piles qui ont toutes été fournies dans un même lot par le fournisseur HK Batteries. Le choix d'un fournisseur belge se justifie par l'obligation de notre part ensuite d'utiliser la filière BEBAT pour le recyclage des batteries, déjà prépayé à la commande. Après investigation plus poussée, nous avons noté que ce lot avait été fabriqué en 2015. Ces batteries ont donc été stockées par le fournisseur pendant 4 ans avant de nous être livrées, ce qui est probablement à l'origine de cette défaillance. Une attention particulière sera accordée à cela lors des prochains suivis.

Les sites où il y a le plus de passages indéterminés sont les sites où il y a eu le plus d'hydrophones affectés par des arrêts précoces d'enregistrement. Les stations aval demeurent moins fiables que les ouvrages, car uniquement caractérisés par 2 hydrophones dont la portée de détection est impactée notamment par les forts débits. Il est difficile d'améliorer la performance des stations aval par ajout d'hydrophones en raison du trafic fluvial et du peu de zones disponibles pour placer un hydrophone de façon sécurisée. Nous avons récemment testé des hydrophones compatibles de la marque ATS, ceux-ci ont des performances 2 à 3 fois supérieures à celles observées par LOTEK. L'incorporation de cette technologie dans le réseau d'hydrophones pourra être envisagée dès qu'il sera nécessaire de renouveler ou remplacer des hydrophones endommagés ou perdus.

Lors des séquences d'enregistrement optimum par le réseau télémétrique, le jeu de données obtenus au droit des ouvrages comporte moins de franchissements indéterminés qu'en 2017. Cela résulte d'une meilleure connaissance des performances de détection des hydrophones, basée sur le suivi 2017 et les nouveaux tests de performance conduit avant l'étude. Il demeure des difficultés à éviter des zones de recouvrement entre la prise d'eau et le barrage sur les sites au fil de l'eau, à savoir CHG, CHA, CHN et CHL. De nouveaux essais d'implantation seront testés prochainement en prévision des suivis futurs.

Le taux de détection des anguilles marquées au cours de ce suivi était plus faible (86,4%) que lors du suivi réalisé en 2017 (96%), tout en restant dans un taux pouvant être considéré comme satisfaisant pour obtenir un jeu de données robuste. Cela est d'autant plus vrai qu'il y a eu une plus faible proportion de passage indéterminés en 2019 qu'en 2017.

En 2019, nous avons utilisé des anguilles capturées en Meuse (N = 29) et des anguilles pêchées dans le Rhin (N = 111), alors que toutes les anguilles provenaient du Rhin en 2017. Le taux de détection des anguilles du Rhin était de 90,1%, contre 72,4% pour les anguilles de Meuse. Le plus faible taux de détection observé en 2019 peut donc s'expliquer par l'influence du lot d'anguilles en provenance de la Meuse. A la vue de ces résultats, il est probable que les anguilles en Meuse puissent rester au stade FIV pendant plus d'une année. Cette hypothèse est confirmée par la recapture dans la pêcherie en 2019 d'un individu FIV capturé sur le même site durant la pêcherie 2018.

D'autres études télémétriques indiquent une variabilité de mise en migration d'individus marqués. Dans la Meuse, un taux de détection de 71% a été rapporté sur un lot 31 anguilles capturées par pêche électrique et par verveux dans des stations d'affluents de la Meuse ou la Meuse elle-même (Verbiest et al. 2012). Lors d'une étude plus ancienne dans la Meuse, un taux de détection au premier barrage suivi de 83% avait été rapporté également (Brujijns et al. 2003). Ce taux est proche

de celui observé pour le lot d'anguilles mosanes suivies dans la présente étude. Dans une autre étude menée dans la Seine en parallèle de la présente étude selon un protocole similaire, le taux de détection était de 67% avec des anguilles argentées issues d'une pêcherie dans la Seine (Beguin et al. 2020).

#### 4.2 *Cinétique de dévalaison observée*

Bien que la majorité des anguilles suivies aient été déversées quelques jours après le premier pic significatif de débit depuis l'été, nos données indiquent un regroupement d'une majorité des migrations avec les pics de débits de la Meuse.

Sous nos latitudes, on observe souvent une concomitance entre les pics de dévalaison et les pics de débit automnaux (Behrmann-Godel & Eckmann 2003 ; Bruijs & Durif 2008 ; McCarthy et al. 2008 ; Økland et al. 2017) mais dans certains bassins versant d'autres facteurs peuvent également influencer comme la lune, la température ou encore la photopériode (Cullen & McCarthy 2003 ; Durif & Elie 2008 ; Stein et al. 2014).

Les détections au niveau des sites directement à l'aval des points de déversements peuvent refléter à la fois du comportement exploratoire pré-dévalaison et à la fois des mouvements migratoires, a contrario, une détection sur le site suivant reflète plus probablement une dévalaison établie. Comme en 2017, c'est aux environs d'un débit seuil en Meuse de 200 m<sup>3</sup>/s sur la plupart des sites que la majorité des passages sont répertoriés, ce qui confirme des hypothèse déjà élaborées en 2017, selon laquelle le module de la Meuse peut grosso modo être considéré comme le débit seuil initiant les vagues de migration (Sonny 2006).

#### 4.3 *Facteurs influençant le succès de migration le long du parcours étudié*

Les données récoltées dans cette étude permettent de suivre le succès de détection des poissons au barrage de Lixhe en fonction de leur point de déversement. Pour le lot déversé le plus en amont, soit à Namur à plus de 80 km de Lixhe, on observe un succès de détection de 45,9% en 2019, contre 34,7% en 2017. Le fait que les migrations soient concentrées durant les pics de débits favorise un passage préférentiel naturellement par le barrage, voie de franchissement considérée comme non impactant à l'inverse des passages par les turbines. En 2019, 283 franchissements par le barrage ont été confirmés, contre 63 par les turbines, ce qui représente au total un taux d'évitement par le barrage de minimum 81,8%. Il est important de rappeler que durant le suivi 2019, des mesures de gestion pilotes ont été prises sur 3 des 6 sites : barrière électrique à CHG, arrêt de turbinage piloté par un modèle de dévalaison à CHA, barrière à bulles à CHR. L'efficacité spécifique de ces mesures est analysée dans un autre rapport dédié spécifiquement. Il est donc à ce stade important de mentionner que l'évitement par le barrage observé peut-être influencé par ces mesures de gestion.

Les mesures de gestion pilotes ont comme point commun de favoriser le passage des anguilles par le barrage plutôt que par les turbines, tout en essayant de perdre le moins de production hydroélectrique. Les données de 2019 comportent moins de passages indéterminés, et nous avons vu précédemment que les passages indéterminés ont, statistiquement, un rapprochement avec les passages centrales. Cela nous a permis d'affiner la dernière voie de franchissement avant la disparition d'une anguille de notre réseau de suivi. Cette disparition peut s'expliquer par : i) une mortalité directe ou indirecte liée à la voie de passage, ii) une prédation ou encore iii) un arrêt de migration. Nous n'avons pas la capacité de quantifier le devenir des poissons manquants, sans doute que toutes les hypothèses ont une influence, mais nous avons récemment pu caractériser par du pistage mobile des patrons de détection de poissons probablement morts. Ramenés au nombre de

passages, la mortalité engendrée par les passages barrages pourrait s'élever jusqu'à à 9.9%. Cette valeur assume que tous les poissons ayant disparus sont morts, ce qui n'est malheureusement pas vérifiable. Comparativement, la mortalité engendrée par les passages centrales s'élèverait à 27,8%, en assumant que tous les passages indéterminés soient des passages centrales, et que tous les poissons disparus soient considérés comme morts, ces deux hypothèses n'étant pas vérifiables. Dans les deux cas, il est probable donc que ces calculs surestiment l'impact réel des voies de passage sur l'anguille.

Néanmoins, cela indiquerait que même en absence de centrales hydroélectriques sur la Meuse, le fractionnement de celle-ci par les barrages construits à des fins de navigation a déjà un impact significatif sur les populations qui viennent de la partie amont de la Meuse wallonne. Par significatif, on entend ici supérieur au taux de mortalité à respecter par les centrales hydroélectriques dans les permis. Il est important de caractériser au mieux ce phénomène, qui est rarement évoqué comme source potentielle de mortalité pour les anguilles en dévalaison. Pourtant, les fortes turbulences et la mise en pression provoquées par le passage en lame de fond au niveau des pertuis de barrage doivent certainement pouvoir affecter la survie des poissons, comme cela a été caractérisé pour les turbines. En particulier, une étude indique que à haute vitesse de l'eau (> 12 m/s), les irrégularités de surface au niveau des structures des barrages peuvent être à l'origine de dépressions suffisamment fortes pour générer de la cavitation (Cada et al. 1999).

#### 4.4 *Cycle nycthéral des franchissements*

Si la majorité des franchissements demeure sous une tendance nocturne, nous avons pu mettre en évidence dans la présente étude une variabilité de la répartition jour/nuit en fonction de plusieurs paramètres. D'abord la distance parcourue : pour les anguilles qui ont franchi les 6 sites lors d'une seule impulsion de migration, on observe une dérive progressive de l'heure de passage vers l'aval des sites, les poissons franchissent les premiers sites durant la nuit, puis les derniers sites durant le jour. Le second facteur interagit avec le premier, le débit de la Meuse, et à travers lui probablement la turbidité, joue un rôle important, car c'est principalement à fort débit que des poissons sont observés en franchissement de jour, alors que la tendance nocturne est plus forte à bas débit.

Sur le plan comportemental, on peut expliquer l'adaptation de l'anguille argentée à migrer sous des conditions de gros débits car présentent plusieurs avantages important pour l'anguille en migration sur le plan biologique : ils permettent de progresser rapidement vers la mer avec un minimum de dépense d'énergie, les hauts débits ne permettent pas au prédateur de chasser avec autant d'aisance qu'à bas débit, la forte turbidité réduit la pression de prédation et inhibe le comportement lucifuge de l'anguille, les forts débits induisent des lames d'eau plus importantes sur les seuil naturels des cours d'eau qui deviennent ainsi plus rapidement franchissable avec des chutes moins importantes.

Dans la Meuse, des études plus anciennes aux Pays-Bas indiquent des tendances nocturnes similaires, avec une majorité des passages compris entre le coucher de soleil et minuit (Brujjs et al. 2003). Dans la Shannon en Irlande, la tendance nocturne de la migration a également été mise en évidence dans un canal d'aménée d'une centrale hydroélectrique, avec une migration plus intense en début de nuit et une moins intense à la fois en nombre d'individus et en vitesse de dévalaison en seconde partie de nuit. Néanmoins, cette observation est fortement corrélée avec les débits et les vitesses de courant provoquées par les turbinages nocturnes de la centrale (McCarthy et al. 2008). Les mêmes auteurs rapportent, sur un autre site d'observation dont le débit est naturel, que en dehors des pics de migration, les anguilles migraient principalement durant la première moitié de la nuit, mais que lors des pics de migration la diminution en seconde moitié de nuit tend à disparaître. La littérature rapporte donc des répartitions journalières de la dévalaison qui peuvent être variables en fonction des conditions de débit et des tendances de migration de l'espèce.



## 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude télémétrique réalisée en 2019-2020 a permis d'obtenir un jeu de données fiable qui renseigne sur les voies de passage des anguilles au droit des différents sites avec moins d'incertitude que lors du suivi de 2017. Le jeu de données ainsi généré sera utilisé pour estimer l'efficacité des mesures pilotes prises sur les différents sites : barrière électrique à CHG, modèle de dévalaison à CHA et barrière à bulles à CHR.

Les données permettent également de mettre en lumière progressivement d'autres impacts, notamment l'impact du franchissement des barrages, qu'il conviendrait de mieux préciser dans le futur. Nous avons également pu avancer la compréhension des patrons journaliers de la dévalaison.

Sur la base des résultats que le rapport d'efficacité des mesures de gestion présentera, la suite du projet LIFE4FISH consistera au déploiement des meilleures mesures retenues à l'échelle des 6 sites. Ensuite, un nouveau suivi télémétrique à l'échelle des 6 sites permettra de mesurer alors l'efficacité des mesures prises sur l'ensemble des sites. Ce suivi est normalement prévu pour l'2022-2023.



## 6 BIBLIOGRAPHIE

Beguïn, J.; Favriou, P. & Sonny, D. Suivi de la dévalaison des anguilles sur la Seine et détermination des voies de passage au droit du complexe hydroélectrique de Poses (2019-2020). Rapport d'étude pour Hydrowatt, 61pp.

Behrmann-Godel, J. & Eckmann, R. 2003. A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (*Anguilla anguilla* L.) in the River Mosel, Germany. *Ecology of Freshwater Fish* **12** : 196-202.

Bruïjs, M. & Durif, C. 2008. Silver eel migration and behaviour. In Spawning migration of the European eel, van den Thillart et al. (eds) : 65-95.

Bruïjs, M.C.M.; Polman, H.J.G.; van Aerssen, G.H.F.M. & Hadderingh, R.H. 2003. Management of silver eel : Human impact on downstream migrating eel in the river Meuse. Final Report Contract Q5RS-2000-31141 : 105 pp.

Cada, G. & Carlson, Thomas & Ferguson, John & Richmond, Marshall & Sale, Michael. (1999). Exploring the Role of Shear Stress and Severe Turbulence in Downstream Fish Passage. 10.1061/40440(1999)57.

Cullen, P. & McCarthy, T.K. 2003. Hydrometric and meteorological factors affecting the seaward migration of silver eels (*Anguilla anguilla*, L.) in the Lower River Shannon. *Environmental Biology of Fishes* **67** : 349-357.

Durif 2003. La migration d'avalaison de l'anguille européenne *Anguilla anguilla* : Caractérisation des fractions dévalantes, phénomène de migration et franchissements d'obstacles. Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 357 pp.

Durif, C.; Dufour, S. & Elie, P. 2005. The silvering process of *Anguilla anguilla* : a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *Journal of Fish Biology* **66** : 1025-1043.

Durif, C. & Elie, P. 2008. Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data. *Fisheries Management and Ecology* **15** : 127-137.

Gosset, C. ; Travade, T. ; Durif, C. ; Rives, J. & Elie, P. 2005. Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant. *River Research and Applications* **21** : 1095-1105.

Havn, T.B. ; Okland, F. ; Teichert, M.A.K. ; Heermann, L. ; Bocherding, J. ; Saether, S.A. ; Tambets, M. ; Diserud, O.H. & Thorstad, E. 2017. Movement of dead fish in rivers. *Animal Biotelemetry* **5** : 7.

Louviere, J. J., Hensher, D. A., & Swait, J. (2000). Stated choice methods: Analysis and application. Cambridge: Cambridge University Press.

McCarthy, T.K.; Frankiewicz, P.; Cullen, P.; Blaszkowski, M.; O'Connor, W. & Doherty, D. 2008. Long-term effects of hydropower installations and associated river regulation on River Shannon eel populations : mitigation and management. *Hydrobiologia* **609** : 109-124.



Økland, F., Teichert, M.A.K., Havn, T.B., Thorstad, E.B., Heermann, L., Sæther, S.A., Tambets, M. & Borcharding, J. 2017. Downstream migration of European eel at three German hydropower stations. NINA Report 1355: 53 pages, including appendix.

Sonny, D. & Roy, R. 2018. 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.

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 interne à Luminus, 68 pp.

Sonny, D. 2006. Etude des profils de dévalaison des poissons dans la Meuse moyenne belge, Thèse de Doctorat en Sciences (Biologie). Université de Liège.

Sonny, D. & Goffaux, D. 2014. Etude de l'impact de la centrale pilote de Hun sur les poissons. Chapitre 3A : Voies de franchissement des smolts de saumon atlantique par suivi télémétrie. Rapport d'expertise à Energie Fleuves, 103 pp.

Sonny, D.; Goffaux, D.; Maréchal, M. & Defaweux, C. 2014. Programme de protection des poissons en dévalaison à la centrale hydroélectrique de Lixhe. Volet 4 : Etude des voies de franchissement du complexe barrage-centrale de Lixhe des anguilles argentées par radio-télémétrie. Rapport d'étude, EDFL, 48p.

Stein, F.; Calles, O.; Hübner, E.; Ostergen, J. & Schroder, B. 2014. Understanding downstream migration timing of European eel (*Anguilla Anguilla*) – Analysis and modelling of environmental triggers. Elforsk rapport 14:51.

Travade, F.; Larinier, M.; Subra, S.; Gomes, P. & De-Oliveira, E. 2010. Behaviour and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* **398** : 01.

Verbiest, H. ; Breukelaar, A. ; Ovidio, M.; Philippart, J.C. & Belpaire, C. 2012. Escapement success and patterns of downstream migration of female silver eel *Anguilla anguilla* in the River Meuse. *Ecology of Freshwater Fish* **21** : 395-403.