



SPW-DGARNE - Direction des Cours d'Eau Non Navigables
7 Avenue Prince de Liège, 5100 Jambes

Rapport final

Vérification de l'attractivité et de l'efficacité de la passe à poissons du barrage du Maka sur le Bocq (Yvoir). Etude comportementale par biotélémetrie.



ULG - LDPH : Benitez, J.P. ; Dierckx, A. ; Bourguignon, S. ; Rimbaud, G. & Ovidio, M.

Profish : Sonny, D. ; Wathez, Q. & Roy, R.

Septembre 2016

Table des matières

1. Mise en contexte de l'étude	1
2. Matériels et méthodes	3
2.1. Site d'étude	3
2.2. Dispositifs de détection des poissons.....	6
2.2.1. Dispositif de détection RFID	6
2.2.2. Dispositif de détection radio	8
2.2.3. Disposition des antennes RFID et radios.....	9
2.2.4. Maintenance et téléchargement des données	11
2.2.5. Fonctionnement des équipements	11
2.3. Capture et marquage des poissons	13
2.3.1. Méthode d'échantillonnage.....	13
2.3.2. Marquages et déversements	14
2.4. Mesures télémétriques et comportementales	16
2.5. Variables environnementales	18
2.6. Mesures hydrauliques au sein de l'échelle à poissons	18
3. Résultats	18
3.1. Comportements d'approches du barrage et attractivité de la passe (individus doublement marqués).....	18
3.1.1. Attractivité et durée de recherche de l'entrée de la passe	18
3.1.2. Jours et heures d'arrivée dans la zone aval du barrage du Maka.....	20
3.2. Analyse des données RFID : évaluation de l'efficacité et comportements au sein de l'échelle à poissons	22
3.2.1. Données globales	22
3.2.2. Rythmes de détections à l'échelle saisonnière	25
3.2.3. Rythmes de détections à l'échelle nyctémérale	27
3.2.4. Analyse des comportements de poissons à l'approche et au sein de l'échelle à poissons.....	31
3.2.5. Durées de franchissement de l'échelle à poissons	36
3.3. Mesures hydrauliques (V, H, dH) au sein de l'échelle à poissons.....	37
4. Discussion	39
4.1. Efficacité des méthodes utilisées	39
4.2. Rythmes saisonniers au niveau du complexe barrage du Maka – Echelle à poissons	41
4.3. Rythme nyctéméral de détection au sein de l'échelle à poissons.....	42
4.4. Etude de l'efficacité de la passe à travers nos modèles biologiques.....	42
4.4.1. Taux d'attractivité et temps de recherche de l'entrée de l'échelle à poissons .	43
4.4.2. Taux et temps de franchissement.....	44

4.5. Analyse des comportements fins	47
4.5.1. Comportements d'approche à l'entrée de l'échelle à poissons	47
4.5.2. Influence du débit du Bocq sur les comportements	47
4.5.3. Comportements post-franchissements	48
5. Conclusions et perspectives	49
6. Remerciements	51
7. Références bibliographiques.....	51

Citation recommandée du rapport

Benitez, J.P.; Dierckx, A.; Bourguignon, S.; Rimbaud, G.; Sonny, D.; Watthez, Q. & Roy, R., Ovidio, M. (2016). Vérification de l'attractivité et de l'efficacité de la passe à poissons du barrage du Maka sur le Bocq (Yvoir). Etude comportementale par biotélémetrie. Rapport final du projet financé par la Direction des cours d'eau non navigables, Service Public de Wallonie. Université de Liège et Profish. 53 pages.

1. Mise en contexte de l'étude

Le Bocq est une rivière de taille moyenne du bassin de la Meuse avec un débit médian de $2,2\text{m}^3/\text{s}$ dans son cours aval, juste avant sa confluence avec la Meuse. Il s'étend sur une longueur totale de 45km, prend sa source à Scy à 305m d'altitude et sa confluence avec la Meuse se situe à Yvoir à 90m d'altitude (figure 1). La pente moyenne de la rivière est de 4,8‰ et le bassin versant du Bocq qui est séparé en deux masses d'eau de surface (Bocq amont et Bocq aval) possède une superficie de 230km^2 . Dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau qui impose aux états membres de l'Union Européenne d'atteindre le « bon état écologique » des masses d'eau de surface, un projet « Life » intitulé WALPHY (LIFE07 ENV/B/000038 ; Verniers et Peeters, 2013) a été financé entre 2009 et 2013. Afin de mener à bien le projet Walphy, trois masses d'eau qui risquaient de ne pas atteindre le « bon état écologique » ont été choisies par les gestionnaires, dont celles du Bocq amont et du Bocq aval. En effet, ces deux masses d'eau ont été classées provisoirement comme « cours d'eau fortement modifiés » selon la nomenclature de la DCE. Selon les indicateurs utilisés, la non atteinte du bon état écologique était principalement dû à la fragmentation longitudinale du cours d'eau par de nombreux obstacles à la libre circulation (33 obstacles sur 45km de rivière). Sur ces 33 obstacles répertoriés, 19 ont été directement concernés par le projet Life-Walphy. Celui-ci a permis l'aménagement de dispositifs de franchissement sur certains obstacles (échelles à poissons modernes à fentes verticales, échelles à poissons semi-naturelles en enrochements ou encore rivières de contournement) ainsi que l'effacement complet d'autres obstacles. Ces aménagements ont été conçus pour assurer la libre circulation piscicole à une échelle multi-spécifique. Enfin, certains tronçons anciennement rectifiés par l'homme dans le but d'être partiellement canalisés ont subi un reméandrement. En plus d'améliorer les qualités hydromorphologiques de la rivière, le projet Walphy avait pour but d'étudier l'impact de ces modifications sur chaque tronçon aménagé, d'un point de vue piscicole, macro-invertébré, physicochimique ainsi que d'un point de vue sédiment.

Dans le cours inférieur du Bocq, le barrage du Maka (figure 2) a été aménagé d'une échelle à bassins moderne à fentes verticales lors du projet Walphy. Le barrage est également équipé d'une turbine en vis d'Archimède permettant la production d'hydroélectricité « fish-friendly » à l'occasion d'une initiative privée. Le barrage du Maka occupe une position stratégique, c'est le barrage le plus en aval, et la passe migratoire qui y est associée joue un rôle essentiel qui conditionne le bon déroulement des échanges de poissons entre la Meuse et le Bocq. Durant

l'année 2013, un monitoring piscicole a été réalisé de mi-février à mi-juin via un piège de capture (Verniers et Peeters, 2013) afin de vérifier le taux d'utilisation de l'échelle par les différentes espèces de poissons. Sur les 4 mois de monitoring, seuls 25 individus appartenant à 6 espèces différentes ont été répertoriés. Des résultats très pauvres qui ont remis en question le bon fonctionnement de l'ouvrage du point de vue de son attractivité, de son efficacité et de son caractère multi-spécifique.

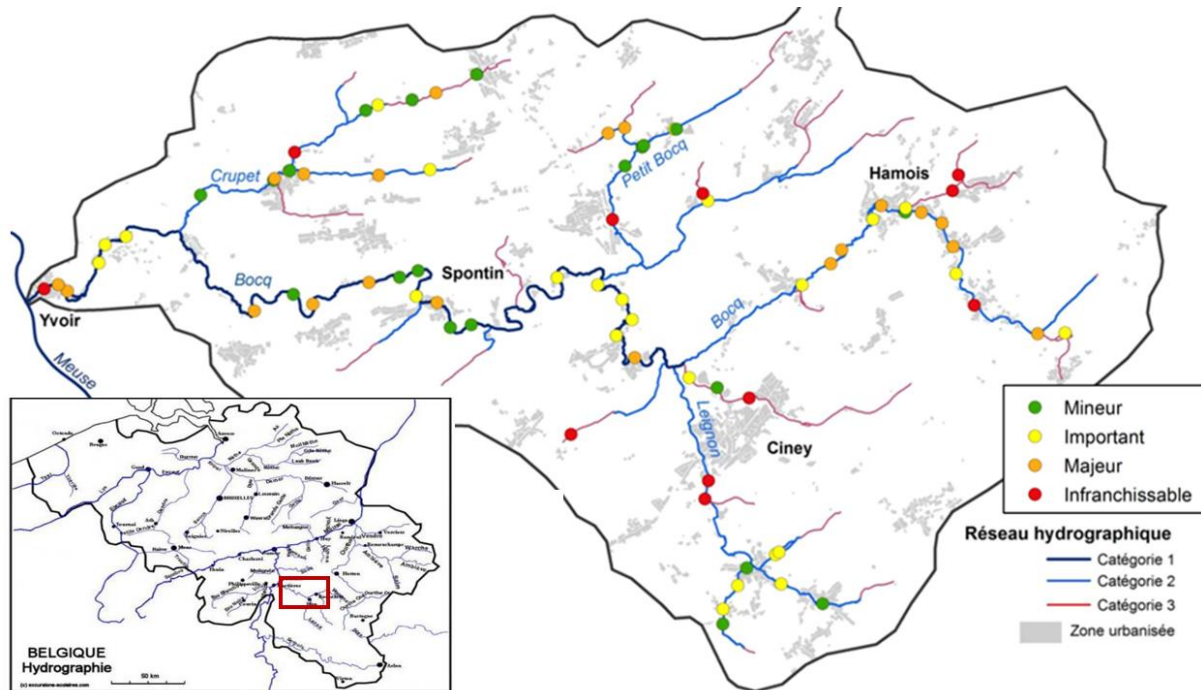


Figure 1 : Localisation et tracé de la rivière du Bocq et de ses affluents principaux ainsi que la localisation de ses différents obstacles



Figure 2 : Vue aval du barrage du Maka sur le Bocq avant aménagement (source : projet Walphy)

Dans la continuité du programme Life-WALPHY, le but de cette étude est d'évaluer l'efficacité globale de l'échelle à poissons du barrage du Maka (attractivité, durée et taux de franchissement) avec des techniques de biotélémétrie (radio et RFID) qui autorisent des suivis comportementaux précis et à l'échelle de l'individu. Les espèces ciblées dans le cadre de cette étude sont la truite commune (*Salmo trutta*), l'ombre commun (*Thymallus thymallus*), le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*), le hotu (*Chondrostoma nasus*) et la vandoise (*Leuciscus leuciscus*). Ce travail a été réalisé avec la collaboration entre Profish-Technology et le Laboratoire de Démographie des Poissons et d'Hydroécologie de l'Université de Liège.

2. Matériels et méthodes

2.1. Site d'étude

Le barrage du Maka (figure 3) est un barrage rampe de 1,9m de haut situé à 380m en amont de la confluence avec la Meuse. En 2011, le barrage est équipé simultanément d'une échelle à poissons et d'une vis d'Archimède en rive droite (figure 4). Il s'agit d'une passe à bassins à fentes verticales de 25m de long (longueur des bassins= entre 3,1 et 3,85m et largeur=1,5m) équipée également d'orifices de fond entre chaque bassin (0,2m x 0,2m). Elle est composée de 7 bassins avec une dh=0,24m (fentes verticales : largeur=0,3m et hauteur d'eau=0,8m). Des vitesses de courant ont été mesurées au sein de chaque échancrure durant le projet Walphy (tableau 1) lorsque l'échelle était colmatée ou non (Verniers et Peeters, 2013). Ces mesures ont démontré l'existence d'un gradient de vitesse croissant de l'aval vers l'amont. Le fond de la passe est tapissé d'enrochements bruts noyés dans le béton afin d'augmenter le caractère multi-spécifique de la passe et permettre à des petites espèces benthiques de l'utiliser (figures 5 et 6). La puissance dissipée totale est de 120W/m³ avec un débit total de 300l/s. D'après sa configuration, ce débit de fonctionnement est garanti jusqu'à 5m³/s dans le Bocq (2x le module). Au-delà de 5m³/s dans le Bocq, le débit passant la passe peut être supérieur. L'entrée de l'échelle est située à proximité de la sortie du rejet de la vis d'Archimède, dans le but d'en augmenter son attractivité.



Figure 3 : Vue aval du complexe barrage du Maka - échelle à poissons - vis d'Archimède

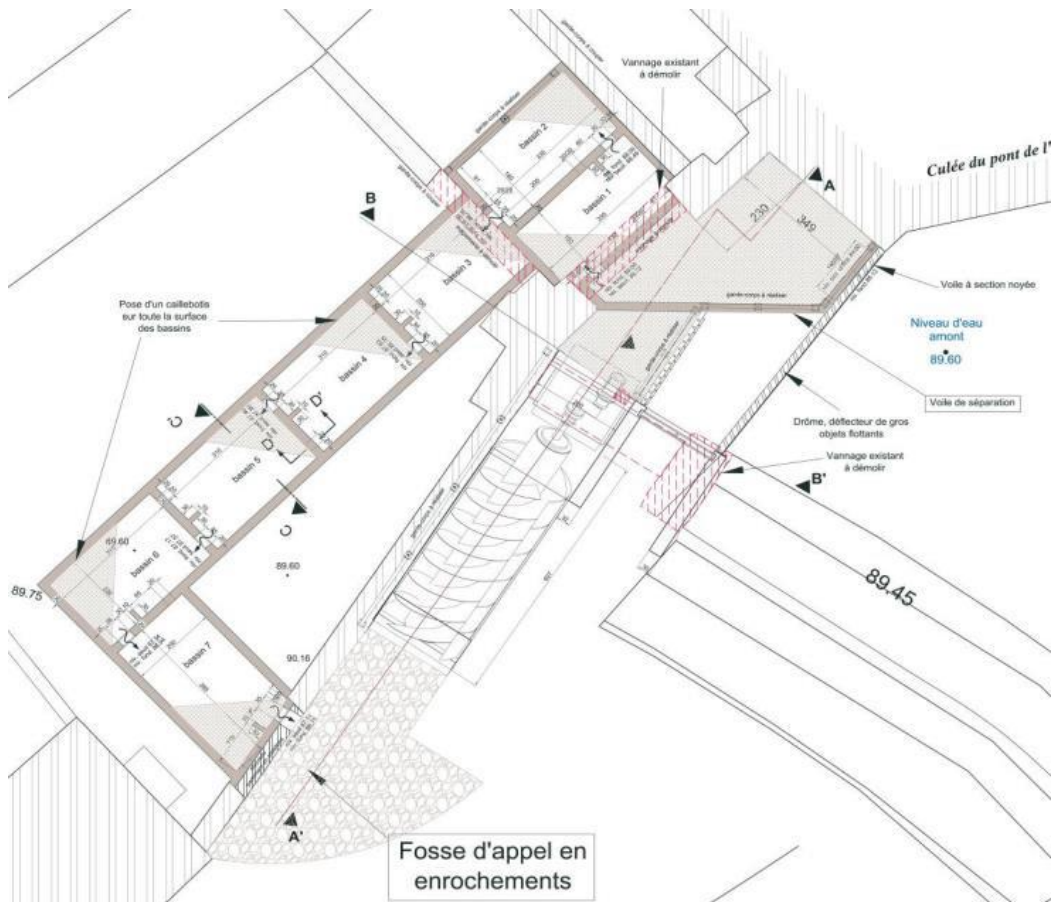


Figure 4 : Plan en vue aérienne de la passe à bassins du barrage du Maka sur le Bocq incluant la vis d'Archimède (source : SPW)



Figure 5 : Bassin à sec de l'échelle à poissons du barrage du Maka (Bocq) avec la présence de la fente verticale, de l'orifice de fond et du substrat en enrochement (source : projet Walphy)

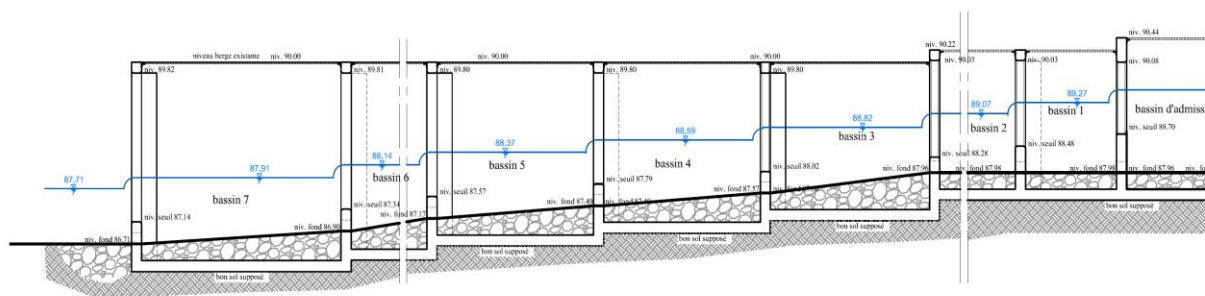


Figure 6 : Schéma de profil de l'échelle à poissons du barrage du Maka (Bocq) (Source : SPW)

Tableau 1 : Vitesse de courant dans les échancrures d'aval en amont mesurées lors du projet Walphy (Verniers et Peeters, 2013)

N° échancrure	Vitesse de courant (m/s)	
	Colmaté	Non colmaté
<i>Aval</i>		
1	0,21	0,25
2	0,38	0,38
3	0,77	0,85
4	1,39	1,33
5	1,25	1,55
6	-	-
7	-	-
8	-	-
<i>Amont</i>		

2.2. Dispositifs de détection des poissons

Afin de vérifier le fonctionnement de la passe à poissons du barrage du Maka, nous avons utilisé deux technologies complémentaires de biotélémetrie: la Radio Frequency Identification (RFID) et la télémétrie radio. La biotélémetrie permet le suivi de comportements individuels de poissons marqués au préalable avec des transpondeurs et/ou émetteurs. Le système a permis d'acquérir des informations très utiles : comportement à l'approche du barrage et comportement lors d'utilisation de l'échelle à poissons.

2.2.1. Dispositif de détection RFID

Le système RFID se compose de transpondeurs (ou marques), de stations d'enregistrement automatiques et d'antennes de détection. Les transpondeurs sont dits semi-passifs car ils ne sont « activés » que si le champ magnétique d'une antenne les stimule. L'avantage de ce type de transpondeurs est qu'ils n'ont pas besoin d'une batterie et qu'ils n'ont pas de limitation de durée de vie. Les antennes émettent des ondes électromagnétiques qui vont activer les marques qui se situent dans leur champ de rayonnement en leur fournissant l'énergie nécessaire dont elles ont besoin pour renvoyer une information codée à la station d'enregistrement. Il s'agit d'un code individuel unique alphanumérique, de la date et l'heure de passage du poisson qui sont ensuite stockés dans la mémoire interne de la station au format .txt.

Le système de détection par RFID au niveau du barrage du Maka, fonctionnel depuis le mercredi 7/10/2015 vers 16h, est constitué de 3 antennes disposées dans la passe à poissons, au niveau des échancrures (figure 7). Ces 3 antennes sont constituées en panneaux marins

protégeant le câble électrique SONO RN 2x 1,5mm². Une 4^{ème} antenne (figure 8) a été placée au niveau de l'orifice de fonds le 5/02/2016. Celle-ci est constituée en PVC 25mm et d'un câble électrique SONO RN 2x 1,5mm². Elle permet d'identifier le passage éventuel de poissons par cet orifice de fond. Hormis les antennes, qui sont intégralement conçues par Profish, le matériel utilisé est celui de la firme Oregon RFID®. Les antennes constituées sont branchées sur un récepteur à multiples entrées pour faciliter leur synchronisation.



Figure 7 : Antennes RFID au sein de l'échelle à poissons du barrage du Maka au niveau des échancrures



Figure 8 : Antenne RFID au niveau de l'orifice de fond

Chaque antenne a été réalisée pour avoir une portée de détection suffisamment importante pour enregistrer les poissons préalablement munis d'un transpondeur traversant l'échancrure. Toutefois, si un individu franchit l'échancrure très rapidement et avec une orientation de transpondeur qui n'est pas tout à fait transversale par rapport au champ de l'antenne, il est possible qu'il ne soit pas détecté par l'antenne. De la même manière, le passage simultané de poissons marqués à travers l'échelle peut créer un problème de « collision » et empêcher la détection d'un des poissons bien que cela soit peu probable dans les études de montaison. Ces phénomènes, inévitables avec le RFID, pourrait entraîner une « incohérence » dans le parcours du poisson au moment de la lecture des données.

2.2.2. Dispositif de détection radio

Le dispositif de détection radio, en fonctionnement depuis le mercredi 7/10/2015, était initialement composé de deux antennes suspendues en aval du déversoir et raccordées à un seul récepteur (figure 9). Le matériel utilisé provient de la firme Sigma Eight®. Cependant, le système a été très rapidement vandalisé le vendredi 9/10/2015 (câble sectionné). Une nouvelle antenne radio, plus discrète et immergée a donc été rapidement remise en fonctionnement. Cette seconde antenne a été placée au pied du déversoir le 13/10/15, et fixée directement sur la structure du barrage. Le champ de détection de l'antenne radio est approximativement de 10 mètres. Ce qui implique qu'un individu muni à la fois d'un émetteur radio et d'un transpondeur RFID sera d'abord détecté à l'antenne radio avant d'être détecté à l'antenne RFID située à l'entrée de l'échelle. Ce système de détection radio permet de vérifier l'attractivité de l'entrée de l'échelle à poissons suite à la mesure du temps entre l'approche du barrage et l'approche de l'entrée de l'échelle à poissons lorsqu'il y a double détection.



Figure 9 : Anciennes antennes radios aériennes (en haut) et antenne radio immergée (en bas) installées en aval du barrage du Maka

2.2.3. Disposition des antennes RFID et radios

Les antennes RFID ont été disposées dans la passe à poissons de manière à minimiser leur impact sur l'écoulement de l'eau dans l'échancrure entre les bassins (figure 10).

- L'antenne 1 (A1) se situe au niveau de la jonction entre le Bocq et le bassin le plus en aval à l'entrée aval de l'échelle à poissons : elle permet l'identification de l'approche et de l'entrée dans l'échelle à poissons
- L'antenne 2 (A2) est à la jonction entre le bassin n°5 et le bassin n°4, à mi-chemin dans la passe à poissons : permet d'acquérir des informations à mi-parcours.

- L'antenne 3 (A3) se situe à la jonction entre le bassin le plus en amont et le bassin d'admission, à l'amont de la passe : elle permet de vérifier s'il y a franchissement complet de l'échelle à poissons. Elle permet également de détecter des poissons qui utiliseraient la passe de l'amont vers l'aval.
- L'antenne 4 (A4) se situe au niveau de l'orifice de fond entre le bassin le plus en amont et le bassin d'admission à l'amont de la passe : elle permet de distinguer un éventuel passage d'un poisson par l'orifice de fond de l'échelle.

Cette complémentarité entre le système de détection radio (approche du barrage) et le système de détection RFID au sein de l'échelle permet de vérifier l'attraction de l'entrée et l'efficacité de l'échelle à poissons.

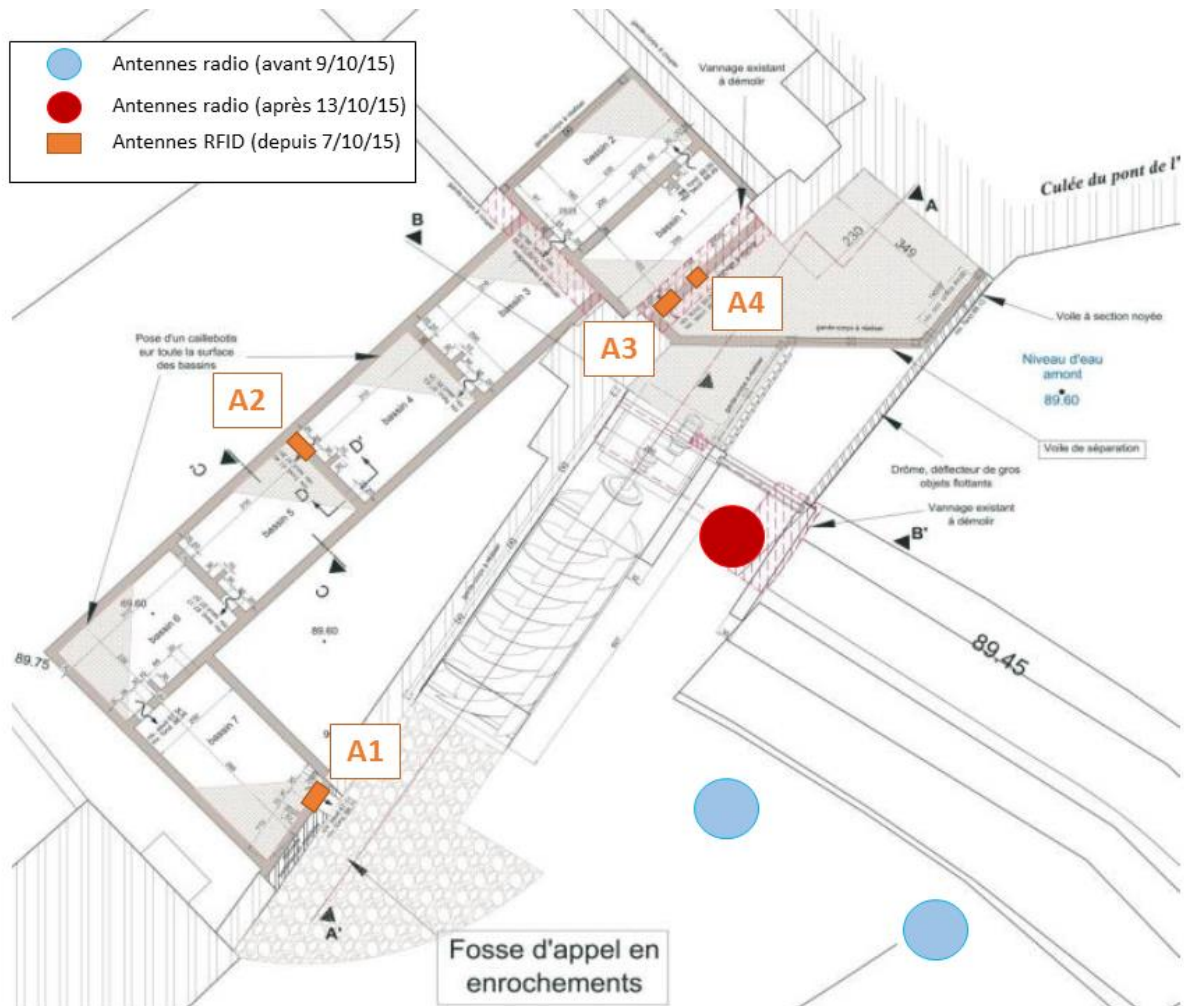


Figure 10 : Dispositifs de détection (RFID + radio) au sein du complexe barrage du Maka - échelle à poissons sur le Bocq

2.2.4. Maintenance et téléchargement des données

Une visite sur site a été réalisée au minimum 2x/semaine afin de s'assurer du bon fonctionnement des différents systèmes de détection et pour télécharger les données des dispositifs de détection radio et RFID. Lors de chaque visite, un test a été effectué avec un transpondeur sur chaque antenne RFID pour vérifier son bon fonctionnement. Le système RFID et le système radio étaient branchés sur un appareil UPS qui agit comme une batterie de secours en cas de coupure de courant.

2.2.5. Fonctionnement des équipements

2.2.5.1. Système de détection par RFID

Le dispositif RFID mis en place sur le Bocq a fonctionné sans interruption durant toute la période de suivi (du 7/10/2015 au 2/02/2016). Les possibles coupures de courant ont pu être prises en charges par l'UPS, qui prend le relais pour alimenter le lecteur en cas de panne. La portée de détection des antennes est vérifiée une à deux fois par semaine et a toujours été bonne.

L'étude s'est principalement déroulée à un moment où la **turbine n'était pas en fonctionnement**. Toutefois, notons que la turbine du barrage a été remise en route le 24/6/2016. A partir de cette date, le système RFID n'était plus fonctionnel car le bruit électromagnétique ambiant était trop important. Plusieurs tests ont été réalisés le 30/6/2016 pour tenter de limiter l'impact de la turbine, mais sans succès. Les portées de détection étaient au mieux réduites à quelques centimètres. Le système a tout de même été laissé actif car pour une raison indéterminée, la turbine était de nouveau inactive lors de la visite suivante le 4/7/2016. Le système RFID a été complètement démonté le 15/7/2016. Il est important d'ajouter que l'échelle à poissons n'était que partiellement fonctionnelle (jusqu'à l'antenne A2) du 3/06/2016 au 24/06/2016 suite à la crue du 3/06/2016 qui a provoqué un colmatage de l'entrée amont de l'échelle.

2.2.5.2. Système de détection par télémétrie radio

Au cours de notre étude, le dispositif de télémétrie a connu certaines perturbations qui ne permettent malheureusement pas d'exploiter pleinement les données acquises. Cependant elles ont permis d'étudier les comportements d'approche du barrage et les temps d'approche de l'échelle à poissons. Elles sont résumées ci-dessous (tableau 2) :

Tableau 2 : Résumé des perturbations radio rencontrées lors de la période d'étude

Date	Problèmes	Conséquences et solution
8/10/15	Le câble qui retenait les 2 antennes a été sectionné suite à un acte de vandalisme.	Plus de données enregistrées entre le 8/10/15 à 19:15 et le 13/10/15 à 15:30. Remise en route d'une nouvelle antenne au pied du barrage le 13/10/15 à 15:30.
19/10/15	Corruption temporaire de la carte MMC (aléa informatique jamais rencontré auparavant).	Pas de données enregistrées entre le 15/10/15 vers 11:00 et le 19/10/15 vers 11:00. Remplacement du récepteur (il n'a été identifié que plus tard, que le problème venait de la carte MMC).
29/10/15	Corruption définitive de la carte MMC	Perte des données entre le 21/10/15 vers 21:00 et le 29/10/15 vers 11:50. Remplacement de la carte MMC et mise en place d'une nouvelle méthode de téléchargement pour éviter la corruption des données. Nous avons essayé de récupérer les données de la carte corrompue, sans succès.
6/11/15	Non-identifié	Les données ne se sont pas enregistrées entre le 31/10/15 vers 9:30 et le 6/11/15 vers 12:50. Nouveau remplacement de la carte MMC.
30/11/15	Faux-contact sur l'amplificateur, apparemment lié au fait que quelqu'un ait tiré sur le câble depuis l'extérieur de l'armoire électrique.	Détection beaucoup moins efficace de l'antenne, et baisse du nombre de contacts en conséquence. Le problème remonte sans doute au 20/11/15, date à laquelle les données deviennent moins nombreuses et a été réglé le 30/11/15 vers 11:00. Remise en état de l'amplificateur et protection du câble avec un nœud.
30/11/15	Non-identifié	Pas de données enregistrées entre le 30/11/15 vers 11:20 et le 6/12/15 vers 15:30. Lors de la visite du 30/11, tout fonctionnait pourtant correctement au moment de quitter le site. La semaine suivante, il n'a pas été possible de télécharger les données radio car l'ordinateur n'était pas disponible, c'est pourquoi le problème n'a pas été identifié rapidement. Les voyants témoins du récepteur fonctionnaient tout de même correctement. Le récepteur s'est remis en route tout seul le 6/12/15.
31/12/15	Carte MMC mal enfoncée dans le récepteur.	Les données ne se sont pas enregistrées entre le 23/12/15 vers 10:50 et le 31/12/15 vers 12:30. Remise en place correcte de la carte MMC
18/01/16	Des milliers de contacts parasites sont enregistrés par jour, dont certains se superposent aux fréquences des poissons.	Les données sont enregistrées mais il devient difficile de discerner les vrais contacts des contacts parasites. Tests de tous les composants du système. La perturbation semble être totalement extérieure à notre dispositif. Le problème sera finalement résolu le 17/5/16, avec le remplacement par un nouveau modèle d'antenne.

2.3. Capture et marquage des poissons

2.3.1. Méthode d'échantillonnage

Pêche à l'électricité

Trois pêches à l'électricité ont été réalisées dans le Bocq (figure 11) durant le projet : le 7 octobre 2015, le 1^{er} mars 2016 et le 18 mai 2016. Les deux premières pêches électriques (7/10/2015 et 01/03/2016) ont été effectuées sur un tronçon de 200m situé à 3km en amont du barrage du Maka, en vue d'une translocation pour forcer un retour vers l'amont (« homing ») et un passage dans l'échelle. La première pêche ciblait des truites fario en migration de reproduction ainsi que des ombres en perspective de leur migration printanière. La seconde pêche visait uniquement des ombres en migration de reproduction. La troisième pêche effectuée le 18/05/2016 s'est déroulée sur un tronçon de 200m situé juste en aval du barrage du Maka et elle ciblait des cyprinidés (barbeau-hotu-vandoise). Cette dernière pêche a été réalisée en aval du barrage car la présence de barbeau (espèce cible) n'était pas confirmée via les recensements historiques sur le Bocq. Chaque pêche a été effectuée en un seul passage avec 2 personnes aux anodes, 4 personnes aux épuisettes et 4 personnes aux mannes. Dans la mesure du possible, les gammes de tailles des individus conservés pour marquage ont été diversifiées, mais en apportant une attention plus particulière aux géniteurs potentiels.

Utilisation de poissons de pisciculture

Lors d'un projet FEP (code 32-1109-005), le CEFRA-ULg basé à Tihange avait en charge l'établissement d'un protocole de production de barbeaux et de hotus en pisciculture (Gennotte et al., 2015). Ce protocole de production devrait servir au soutien des différentes populations des deux espèces en Wallonie via des programmes de déversements futurs. A la fin du projet, des poissons excédentaires élevés au CEFRA-ULg devaient être déversés dans le milieu naturel. Profitant de cette opportunité et en accord avec la DNF, la direction des cours d'eau non navigables, le CEFRA-ulg, Profish et le LDPH-ulg, une partie de ces individus a été utilisée dans le cadre de cette étude et déversés dans le Bocq. Cette manipulation s'est déroulée le 26 octobre 2015 et les poissons ont été déversés à 120m en aval du barrage du Maka sur le Bocq. Au total N=30 barbeaux et N=29 hotus (car 1 mort durant le transport) ont été utilisés. L'utilisation de ces poissons pour cette étude était une opportunité intéressante, mais assez risquée au vu du changement brutal de milieu de vie occasionné aux poissons.



Figure 11 : Site de capture situé 3km en amont du barrage du Maka (à gauche) et capture par pêche à l'électricité (à droite) réalisée le 7 octobre 2015

2.3.2. Marquages et déversements

Deux types de marquage ont été effectués sur les poissons (tableau 3) :

- 1) N=162 poissons (37 truites, 34 ombres, 30 barbeaux, 33 hotus et 28 vandoises) ont été équipés via une incision de 5mm et insertion intrapéritonéale, d'un transpondeur RFID HDX (23 mm) qui permet une identification individuelle lors de leur passage à travers les antennes RFID placées dans l'échelle à poissons du barrage du Maka.
- 2) N=24 poissons (10 truites communes, 10 ombres et 4 barbeaux) ont été équipés à la fois d'un transpondeur RFID HDX (23mm) et d'un émetteur radio Pisces 80mAh 9,6 x 26 mm (4,5g). L'insertion de l'émetteur radio a été réalisée suite à une incision dans la cavité intrapéritonéale et l'application de deux points de suture selon des méthodologies définies dans la littérature scientifique (Ovidio et al., 1998, 2004, 2007) (figure 12). Ce double marquage permet de détecter en plus du passage par l'échelle à poissons, une approche préalable du barrage via les antennes radios.

Après marquage, tous les poissons ont été transloqués de leur site de capture et déversés à 120m en aval du barrage du Maka, le jour même de leur capture (figure 13). Ce qui représente au total N=186 poissons dont N=24 doublement marqués.

Tableau 3 : Données de marquages RFID et radio par espèce

Espèces	Lieu d'origine	Date de marquage	N	Taille moy. (mm)	Taille min. (mm)	Taille max. (mm)	Poids moy. (g)	Poids min. (g)	Poids max. (g)
RFID									
Truite	Bocq (amont Maka)	07-10-15	37	229	180	299	146	77	331
Ombre	Bocq (amont Maka)	07-10-15	30	243	209	335	158	93	427
Ombre	Bocq (amont Maka)	01-03-16	4	235	215	243	128	92	152
Barbeau	Tihange (CEFRA-Ulg)	26-10-15	30	278	190	397	329	93	919
Hotu	Tihange (CEFRA-Ulg)	26-10-15	29	260	211	304	234	103	410
Hotu	Bocq (aval Maka)	18-05-16	4	462	449	475	1282	1124	1394
Vandoise	Bocq (aval Maka)	18-05-16	28	199	154	257	107	45	218
Sous-total RFID			162						
Radio-RFID									
Truite	Bocq (amont Maka)	07-10-15	9	338	270	430	496	236	867
Truite	Bocq (amont Maka)	01-03-16	1	301	-	-	321	-	-
Ombre	Bocq (amont Maka)	07-10-15	3	338	323	360	424	362	522
Ombre	Bocq (amont Maka)	01-03-16	7	278	244	382	256	154	672
Barbeau	Bocq (aval Maka)	18-05-16	4	490	291	596	1806	360	3185
Sous-total Radio-RFID			24						
Total			186						



Figure 12 : Matériels de mesures biométriques et de marquage (à gauche) et marquage radio (à droite)



Figure 13 : Translocation et déversement des individus marqués à 120m en aval du barrage du Maka

2.4. Mesures télémétriques et comportementales

Les marquages RFID et radio permettent d'étudier le comportement individuel des poissons marqués qui s'approchent et/ou utilisent l'échelle à poissons du barrage du Maka. Les mesures télémétriques et comportementales sont définies :

Mesures télémétriques

- Une **détection RFID**: lorsqu'un poisson est détecté à au moins à l'une des quatre antennes RFID ;
- Une **détection radio** : lorsqu'un poisson muni d'un émetteur radio est détecté à l'antenne radio ;

Mesures comportementales en aval du complexe barrage-échelle-turbine (radio+RFID : N=24)

- Une **approche du complexe barrage du Maka – échelle à poissons** : lorsqu'un poisson muni d'un émetteur radio est détecté par l'antenne radio installée en aval du barrage ;
- Une **approche de l'échelle à poissons** : lorsqu'un poisson muni d'un transpondeur RFID est détecté en A1 (à l'entrée aval) de l'échelle à poissons avec un délai minimum de 30min avant une autre détection à cette même antenne ;
- La **durée d'approche de l'échelle à poissons** : temps entre la première détection radio et la première détection en A1 pour les individus doublement marqués ;

- Le **taux d'approche du barrage du Maka** : C'est le rapport entre le nombre d'individus doublement marqués détectés à l'antenne radio et le nombre total d'individus doublement marqués
- Le **taux d'attractivité de l'échelle à poissons** : pourcentage d'individus doublement marqués détectés à l'entrée de l'échelle à poissons (détection RFID) par rapport au nombre d'individus détectés en aval du barrage (détection radio) ;

Mesures comportementales à l'intérieur de l'échelle (RFID)

- La **détection la plus en amont** (A1, A2 et A3) : elle représente la détection la plus en amont observé dans l'échelle à poissons pour un même individu ;
- Un **franchissement partiel**: lorsqu'un poisson est détecté jusque l'antenne 2 puis fait demi-tour et retourne dans le tronçon aval : détections A1-A2-A1 ;
- Un **aller-retour** : lorsqu'un poisson est détecté à toutes les antennes avec un de délai de moins de 30min en A3 puis retourne finalement dans le tronçon aval : détections A1-A2-A3(<30min)-A2-A1 ;
- Un **franchissement (F)** : lorsqu'un poisson est détecté à toutes les antennes de l'échelle à poissons de l'aval vers l'amont : détections A1-A2-A3. Ce franchissement s'établit lorsque la dernière détection enregistrée a été observée à l'antenne A3 (la plus en amont) et qu'il n'y a plus de détection à cette antenne dans un délai de 30min ;
- La **durée de franchissement** : temps qu'un poisson a mis pour réaliser un franchissement c'est-à-dire le temps entre la première détection en A1 et la dernière détection en A3 ;
- Le **taux de franchissement total** : c'est le rapport entre le nombre d'individus qui ont réalisé un franchissement et le nombre total d'individus d'une même espèce marqués et relâchés en aval du barrage;
- Le **taux de franchissement corrigé**: c'est le rapport entre le nombre d'individus qui ont réalisé un franchissement et le nombre d'individus détectés préalablement au sein de l'échelle à poissons : détections en A1 et/ou A2 et/ou A3 ;
- La **durée de transit entre deux antennes** : temps qu'un poisson a mis entre deux antennes RFID de l'échelle à poissons (A1-A2 et A2-A3) c'est-à-dire le temps entre la dernière détection de l'antenne aval et de la première détection de l'antenne amont ;
- Le **temps de sortie dans le dernier bassin** : temps entre la première et la dernière détection en A3 lorsqu'un poisson effectue un franchissement ;
- Une **dévalaison via l'échelle à poissons** : lorsqu'un poisson utilise l'échelle à poissons dans le sens de la dévalaison (détection A3 - A2 - A1) après avoir réalisé un franchissement ;

- Une **dévalaison via le barrage** : lorsqu'un poisson est détecté directement en A1 ou par l'antenne radio après avoir réalisé un franchissement.

2.5. Variables environnementales

L'enregistrement des facteurs environnementaux durant cette étude permet d'étudier l'influence de ces variables sur les données observées. La température de l'eau du Bocq a été enregistrée à l'aide d'un enregistreur automatique de température (Onset TidBit) placé juste en amont du barrage du Maka. Le débit a été téléchargé à partir du site Aqualim (SPW-DGO3-DGARNE-DCENN) au niveau de la station d'Yvoir installée sur le Bocq en amont du barrage du Maka.

2.6. Mesures hydrauliques au sein de l'échelle à poissons

En juillet 2016, des mesures de vitesses de courant ont été effectuées avec un courantomètre (modèle Flo-Matc 2000, Marsh-McBirney INC). Le protocole de mesure consistait à effectuer la mesure de 5 vitesses au centre de chaque échancrure selon un gradient vertical de la lame d'eau. Des hauteurs de lame d'eau ont également été réalisées à partir du haut du seuil (entre deux bassins) jusqu'au niveau d'eau du bassin amont. Dans un second temps, en septembre 2016, des mesures de types de jets d'eau ont été effectuées en comparant le niveau d'eau au centre du bassin amont et au centre du bassin aval. Ces mesures permettent de vérifier les conditions hydrauliques des jets d'eau entre les bassins pour les espèces « non sauteuses » via le guide ICE (Baudoin et al., 2014).

3. Résultats

3.1. Comportements d'approches du barrage et attractivité de la passe (individus doublement marqués)

Pour les individus doublement marqués (radio + RFID : N=24), la présence de l'antenne radio au pied du barrage permet de déterminer avec plus de précision le comportement d'approche des poissons lors de leur montaison au niveau du complexe barrage du Maka – échelle à poissons après leur déversement en aval.

3.1.1. Attractivité et durée de recherche de l'entrée de la passe

N= 24 individus ont été doublement marqués : 10 truites, 10 ombres et 4 barbeaux (figure 14). N= 10 **truites (100% de taux d'approche du barrage)** ont été détectées à l'antenne radio en aval du barrage dont N=4 à l'entrée de l'échelle à poissons (détection RFID), ce qui donne un

taux d'attractivité de 40%. Pour les **ombres**, N= 10 (**100% de taux d'approche du barrage**) ont été détectés devant le barrage via l'antenne radio dont N=4 ont été à l'entrée de l'échelle par la suite, ce qui traduit un **taux d'attractivité de 40%**. Ce résultat démontre que la totalité des salmonidés radio-marqués a réalisé une approche du barrage, mais moins de la moitié sont finalement entrés dans la passe à poissons. Concernant les **barbeaux**, les 4 individus doublement marqués ont été détectés par l'antenne radio (**100% de taux d'approche du barrage**), mais aucun n'est rentré dans la passe à poissons, ce qui donne **0% de taux d'attractivité**.

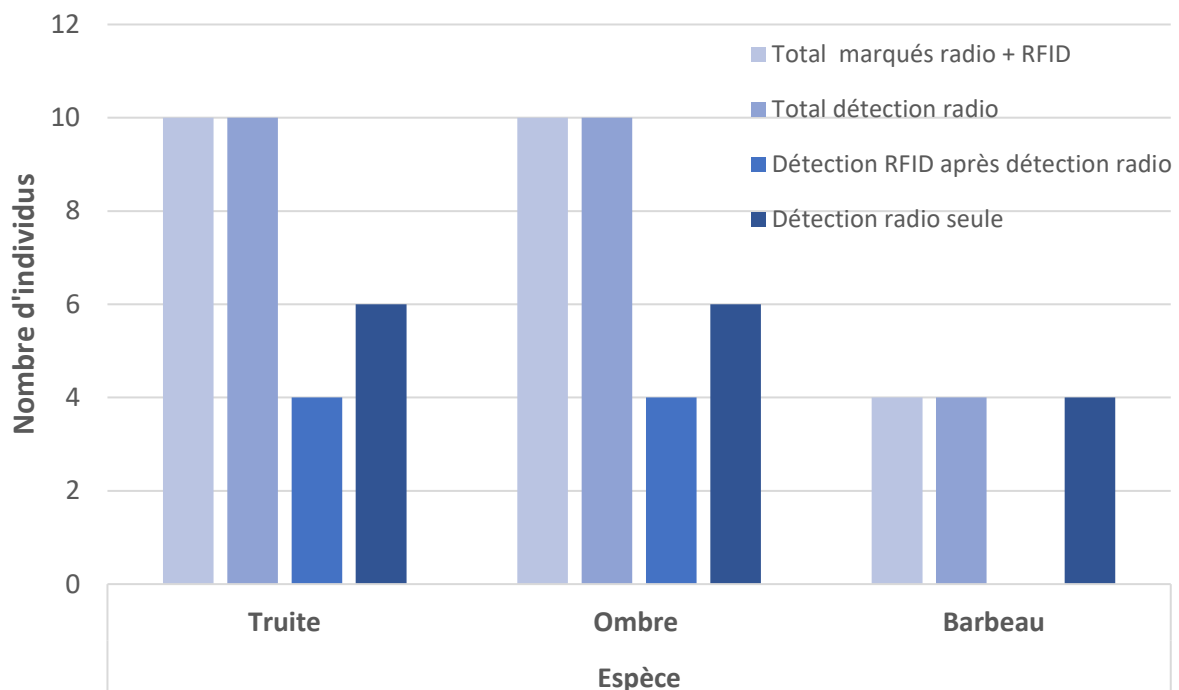


Figure 14 : Synthèse des comportements d'approche des individus des trois espèces doublement marquées sur la base des détections en radio (approche du barrage) et RFID (approche de l'échelle)

Le système de double marquage permet de quantifier lorsqu'il y a double-détection (radio + RFID), une **durée d'approche de l'échelle à poissons**, autrement dit un temps de recherche de l'entrée de la passe à poissons (tableau 4). Ainsi, sur les 24 individus doublement marqués, seuls 8 (33%), uniquement des salmonidés, sont détectés à la fois à l'antenne radio et au complexe RFID de l'échelle à poissons. Pour les 4 truites, le temps écoulé entre l'approche au barrage et la découverte de l'entrée de la passe à poisson s'étend de 1h40 à 233h (temps médian= 12h45). Pour les 4 ombres, le temps de recherche s'étend de 376h à 786h (temps médian= 496h).

Tableau 4 : Données de détection (en **date + hh :mm**) et de durée d'approche (en **hh:mm:ss**) de l'échelle à poissons pour les individus doublement marqués (radio + RFID) avec le nombre de jours entre () lorsque >48h et si oui ou non le poisson a effectué un franchissement de l'échelle (F)

Espèce	1 ^{ère} détection radio	1 ^{ère} détection RFID	Durée d'approche	F	Durée moyenne	Durée min.	Durée max.	Durée médiane
Truite	7/10/15 18:08	8/10/15 07:35	13:26:59	oui				
Truite	7/10/15 17:42	7/10/15 19:23	1:40:43	non				
Truite	7/10/15 19:47	8/10/15 07:50	12:02:34	non	65:07:53 (<3j)	1:40:43	233:21:17	12:44:46
Truite	1/03/16 21:14	11/03/16 14:36	233:21:17 (10j)	oui				
Ombre	1/03/16 21:40	17/03/16 13:48	376:08:12 (16j)	oui				
Ombre	1/03/16 16:04	3/04/16 10:57	786:53:19 (33j)	non				
Ombre	1/03/16 19:01	21/03/16 04:49	465:48:17 (19j)	oui	538:49:30 (22j)	376:08:12	786:53:19	496:08:14
Ombre	3/03/16 15:11	25/03/16 14:09	526:28:12 (22j)	non				

3.1.2. Jours et heures d'arrivée dans la zone aval du barrage du Maka

La date de première détection (figure 15) des **truites** à la suite des déversements du 07/10/15 (N=9) et du 01/03/16 (N=1) se fait rapidement après leur translocation c'est-à-dire après un temps médian <1j (min <1j et max=14j). On remarque un pic élevé d'individus détectés pour la première fois, vers la mi-octobre après le déversement du 7/10/15 (N=6 : 67% des poissons déversés le 7/10/15). La truite déversée le 01/03/16, a été détectée en aval du barrage du Maka le jour même de son déversement. Les **ombres** sont détectés également dans les jours qui suivent leur translocation du 07/10/15 et du 01/03/16 avec un temps médian respectivement de 13j (min=6j et max=14j) et <1j (min <1j et max=2j). Enfin les **barbeaux** (N=4) marqués le 18/05/16 ont tous été détectés le lendemain de leur déversement (le 19/05/16).

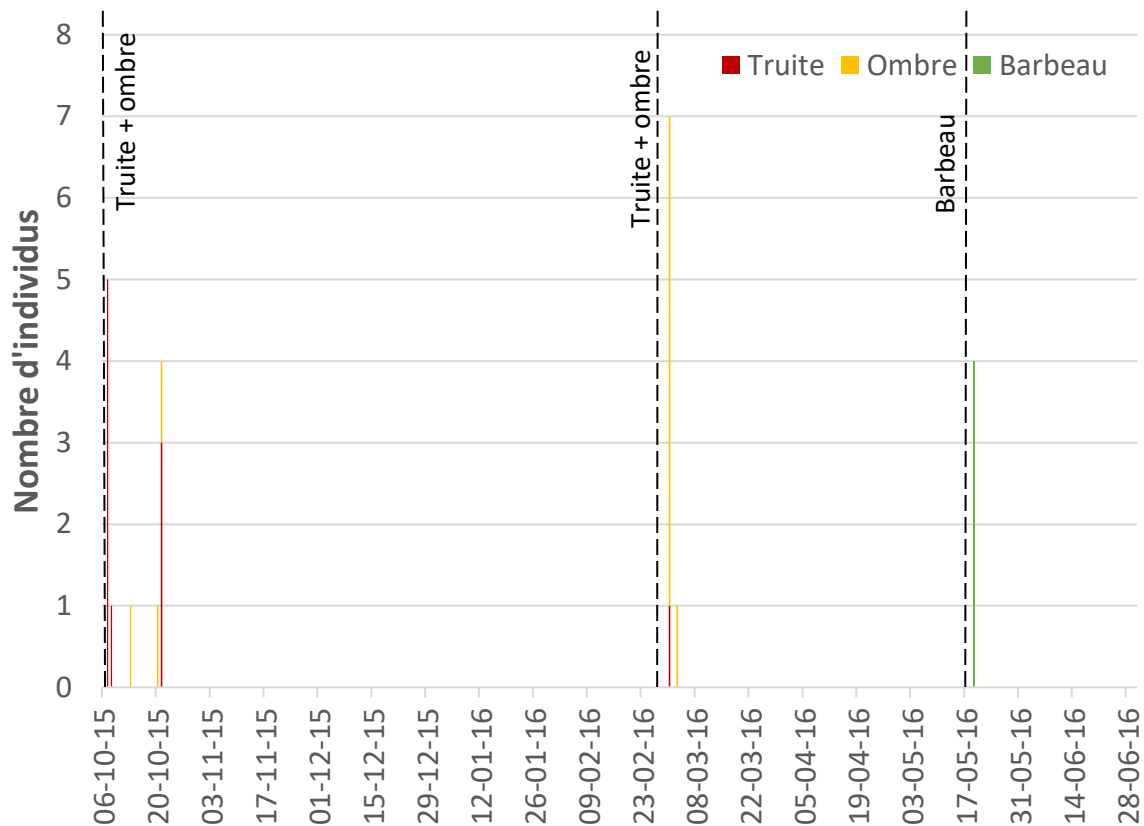


Figure 15 : Date de première détection des individus doublement marqués (radio + RFID) au niveau de l'antenne radio au pied du barrage du Maka

Pour les trois espèces radio-marquées (truite – ombre – barbeau), les premières détections radio selon le cycle nyctéméral se déroulent entre 06h et 00h (figure 16). Les truites sont détectées pour la première fois en aval du barrage principalement en fin de journée et en début de nuit (70% de 17h à 21h). Pour les ombres, les premières détections se déroulent préférentiellement de 15h à 19h (60%). Enfin les 4 barbeaux ont été détectés en aval du barrage pour la première fois entre 20h et 23h en début de nuit.

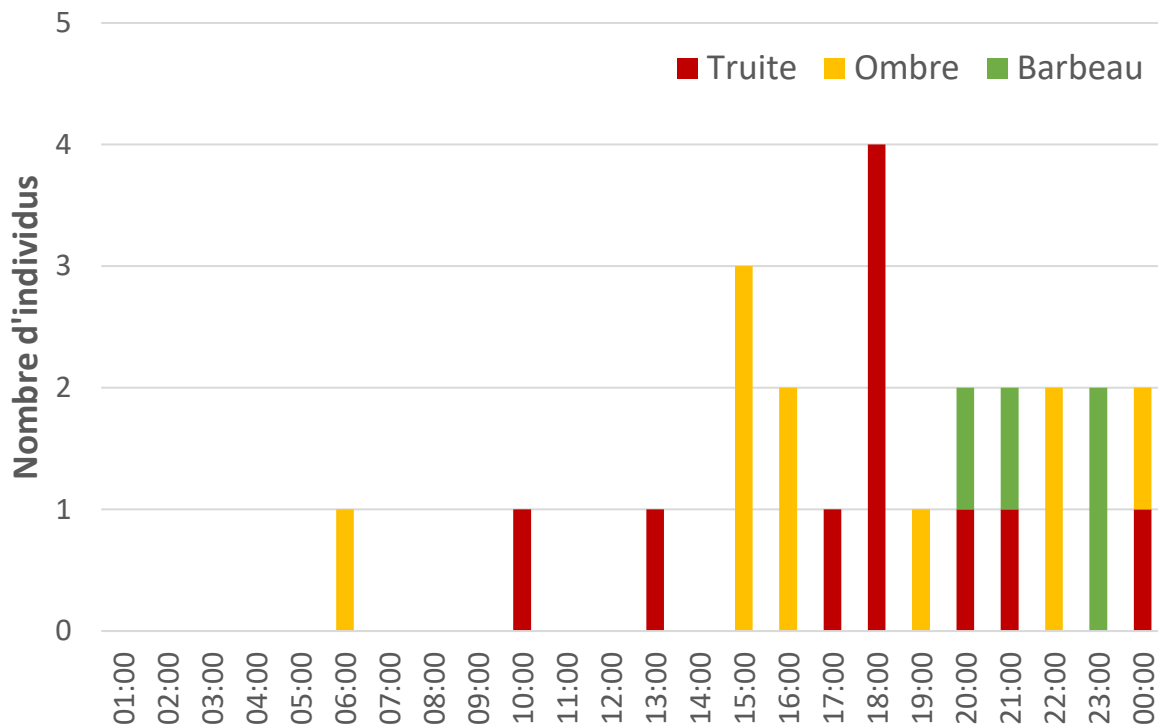


Figure 16 : Nombre d'individus doublement marqués (radio + RFID) par heure selon leur première détection au niveau de l'antenne radio au pied du barrage.

3.2. Analyse des données RFID : évaluation de l'efficacité et comportements au sein de l'échelle à poissons

3.2.1. Données globales

Le marquage RFID permet d'étudier le comportement individuel des poissons munis d'un transpondeur, approchant et/ou utilisant l'échelle à poissons du barrage du Maka. Depuis fin juin 2016 (fin de l'étude d'un point de vue expérimental), parmi la totalité des individus munis d'un transpondeur RFID (N=186), les données de détection récoltées au sein de l'échelle à poissons sont les suivantes (tableau 5):

- N= 23 truites (49% des individus marqués) ont été détectées au niveau des différentes antennes RFID de l'échelle à poissons. N=20 ont exécuté un franchissement de l'échelle à poissons et sont parvenues en amont du barrage, ce qui représente **un taux de 87% de franchissement corrigé et 43 % de franchissement total**.
- N=9 ombres (20% des individus marqués) ont été détectés au sein de l'échelle à poissons et N=5 ont franchi entièrement le barrage, soit un taux de **franchissement corrigé de 55% et un taux de franchissement total de 11%**.
- N= 14 barbeaux (41% des individus marqués) ont été détectés par le complexe RFID et un individu a réalisé un franchissement total (un individu provenant de la pisciculture

CEFRA-Ulg), ce qui correspond à un taux de **7 % de franchissement corrigé** et à **3% de taux de franchissement total**.

- N= 6 vandoises (21% des individus marqués) ont été détectées mais aucune n'a franchi le barrage (**taux de franchissement = 0%**).
- Aucun hotu n'a été détecté par les antennes RFID de l'échelle à poissons : **taux de franchissement = 0%**

Lorsque l'on compare les résultats pour les deux familles de poissons étudiées (salmonidés et cyprinidés), les résultats sont très différents. En effet, sur les N=91 **salmonidés** marqués, N=32 ont été détectés au sein de l'échelle à poissons et N=25 ont effectué un franchissement total (**35% de franchissement total** et **78% de franchissement corrigé**). Au contraire, sur les N=95 **cyprinidés** marqués, N=20 ont été détectés au sein de l'échelle dont N=1 a réalisé un franchissement total (**1% de taux de franchissement total** et **5% de taux de franchissement corrigé**).

Tableau 5 : Données de détections RFID par espèce indiquant le lieu d'origine des poissons, le nombre d'individus marqués, le nombre d'individus détectés, le nombre d'individus qui ont réalisé un franchissement (FR) de l'échelle à poissons, le pourcentage de franchissement total ainsi que le pourcentage de franchissement corrigé. Les nombres entre parenthèses correspondent aux individus doublement marqués (RFID et radio)

Espèces	Origine	N marqués	N détectés	N F	% F total	% F corrigé	N sans F
Salmonidés							
Truite <i>Salmo trutta</i>	Bocq amont	47	23 (4)	20 (2)	43%	87%	3 (2)
	Bocq amont automne	33	1	1	3%	100%	0
Ombre <i>Thymallus thymallus</i>	Bocq amont printemps	11	8 (4)	4 (2)	36%	50%	4 (2)
	Sous total	91	32	25	35%	78%	7
Cyprinidés							
Barbeau <i>Barbus barbus</i>	Pisciculture	30	14	1	3%	7%	13
	Bocq aval	4	0 (0)	0 (0)	0%	0%	0
Hotu <i>Chondrostoma nasus</i>	Pisciculture	29	0	0	0%	0%	0
	Bocq aval	4	0	0	0%	0%	0
Vandoise <i>Leuciscus leuciscus</i>	Bocq aval	28	6	0	0%	0%	6
Sous-total		95	20	1	1%	5%	19
Total		186	52	26	14%	50%	26

L'analyse comparative, deux à deux, de la taille des poissons montre qu'il n'existe pas de différence significative entre les poissons détectés, les poissons non détectés, les poissons qui ont franchi et la totalité des poissons marquées pour chaque espèce (Mann-Whitney, $p > 0.05$) (figure 17) :

- La taille moyenne des truites marquées est de 230mm. Aucune différence significative de la taille (Kruskal-Wallis, $p=0,6283$) n'a été observée entre les poissons non détectés (ND), les détectés (D) et celles qui ont franchi (F) (ND : moyenne=222mm ; D : moyenne=245mm ; F : moyenne= 239,5mm) ;
- La taille moyenne des ombres marqués est de 242mm. Aucune différence significative de la taille n'a été observée entre les groupes détectés, non détectés et qui ont franchi (Kruskal-Wallis ; $p\text{-value}= 0,9641$) (ND : moyenne= 240mm ; D : moyenne= 243mm ; F : moyenne= 242) ;
- La taille moyenne des barbeaux marqués est de 278,5mm. Aucune différence significative de la taille n'a été observée entre les groupes non détectés, détectés et qui ont franchi (Mann-Whitney; $p\text{-value}= 0,3205$) (ND : moyenne= 315,5 ; D : moyenne= 231,5mm ; F : moyenne= 229,0mm) ;
- La taille moyenne des vandoises marquées est de 194,5mm. Aucune différence significative de la taille n'a été observée entre les groupes non détectés et détectés (Mann-Whitney ; $p\text{-value}= 1$) (ND : moyenne= 193,0mm ; D : moyenne= 195,5mm).

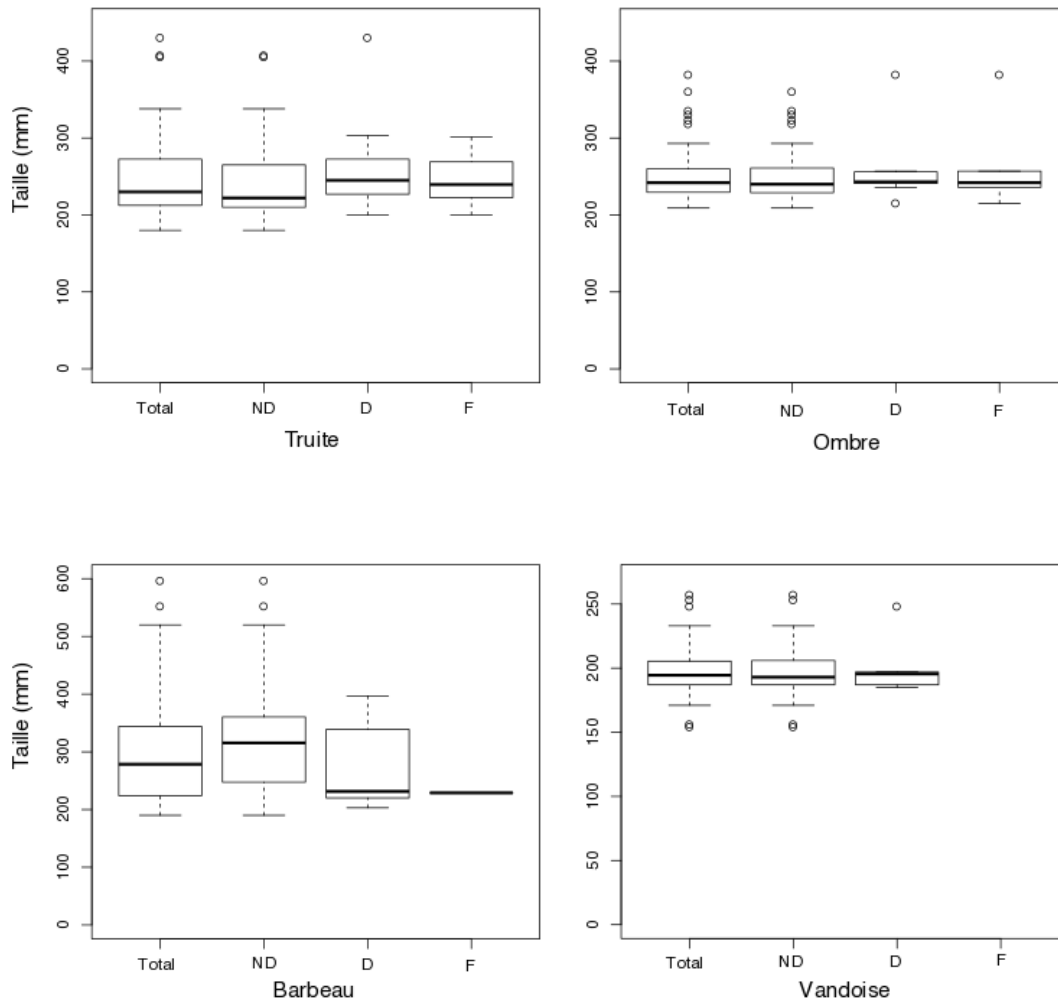


Figure 17 : Boîtes de dispersions des données de taille par espèces pour tous les individus marqués (total), les individus non détectés (ND), les individus détectés (D) et les individus qui ont franchi (F)

3.2.2. Rythmes de détections à l'échelle saisonnière

Les espèces détectées par le complexe RFID (truite – ombre – barbeau - vandoise) se présentent au sein de l'échelle à poissons à différentes périodes de l'année (figures 18 et 19). On observe que les **truites** sont détectées pour la première fois après une moyenne de 15 jours (j) ($\text{min} < 1\text{j}$; $\text{max} = 42\text{j}$) au niveau de l'échelle à poissons après leur translocation le 07/10/15 à une température moyenne de 12,3°C et un débit moyen de 1,14 m³/s. Quant à l'unique individu transloqué le 01/03/16, il est détecté après 10 jours. Leur pic de présence se déroule de début octobre à début novembre (température supérieure à 14°C et débit de 1 m³/s). On remarque qu'un individu est détecté continuellement au niveau de l'entrée aval de l'échelle à poissons au cours de l'expérience. La truite concernée utilise probablement le bassin aval de l'échelle comme un habitat de refuge étant donné que les détections sont constantes (vers 8h00 et vers 20h) chaque jour, ce qui correspond à sa période d'activité journalière.

Les premières détections des **ombres** déversés au printemps (01/03/16) sont observées en moyenne 22 jours (min<1j et max=33j) après leur déversement. Les détections sont plus importantes de début mars à fin juin lorsque la température est comprise entre 8 et 12°C. En revanche, parmi les ombres déversés le 07/10/15 (automne), on observe une seule détection d'un individu à la mi-décembre, 72 jours après son déversement.

Les **barbeaux**, marqués et relâchés le 26/10/15 (poissons de pisciculture) sont détectés pour la première fois en moyenne 19 jours (min=5j et max=26j) après leur déversement. Ils sont principalement détectés de fin octobre à début décembre. Parmi les barbeaux capturés, marqués et relâchés le 18/05/16, aucune détection n'a été observée au sein de la passe à poissons malgré leur présence en aval du barrage (données radio).

Les **vandoises** marquées lors de la dernière pêche électrique soit le 18/05/16, sont détectées pour la première fois en moyenne 13 jours (min=13j et max=15j) après leur marquage. Elles sont détectées au sein de l'échelle sur deux jours (31 mai et 1^{er} juin). Cette période correspond à une période de crues pour une température allant de 12,5 à 13°C et un débit de 8m³/s en moyenne.

Aucun **hotu** d'élevage n'a été détecté par les antennes RFID alors qu'ils ont été marqués et déversés en même temps que les barbeaux lors du déversement du 26/10/15. De même, aucun hotu capturé et marqué lors de la pêche du 18/05/16 n'a été détecté.

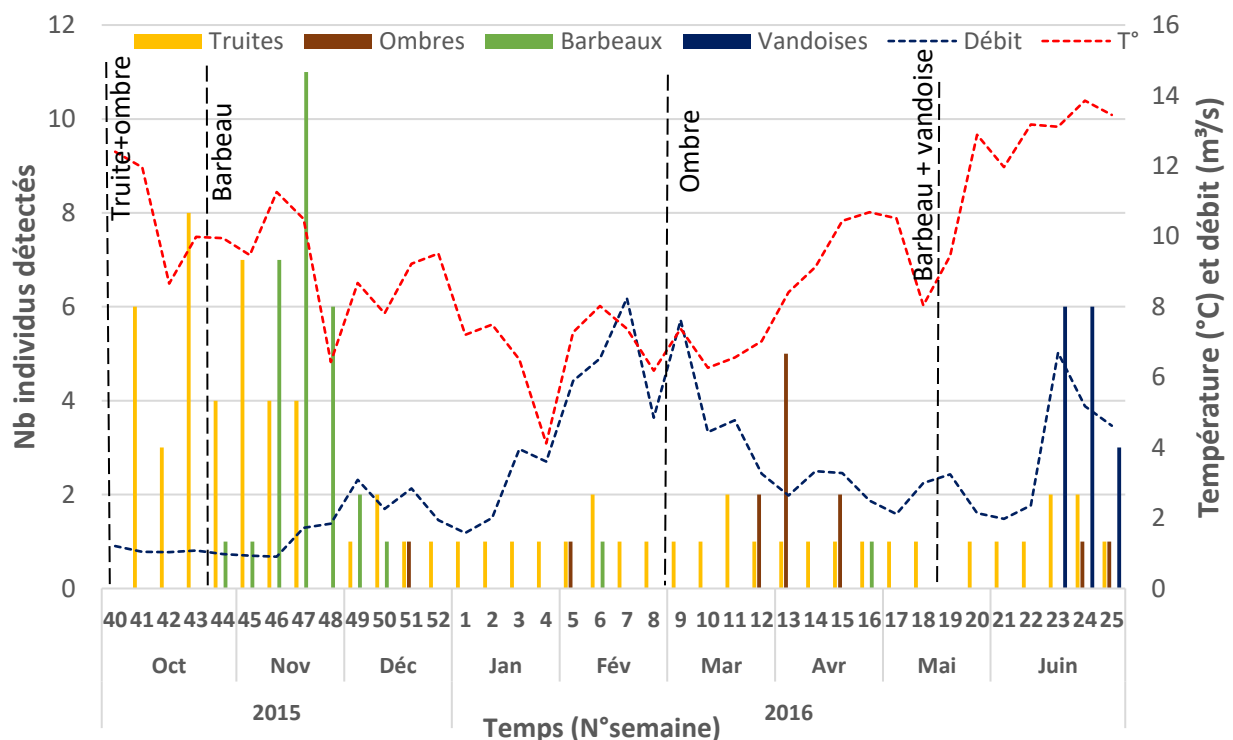


Figure 18 : Première détection par individus en fonction de la date au niveau du complexe RFID de l'échelle à poissons. Déversement de truites et ombres le 7/10/15, déversement de barbeaux et hotus le 26/10/15, déversement de truites et ombres le 01/03/16 et déversement de barbeaux et vandoises le 18/05/16

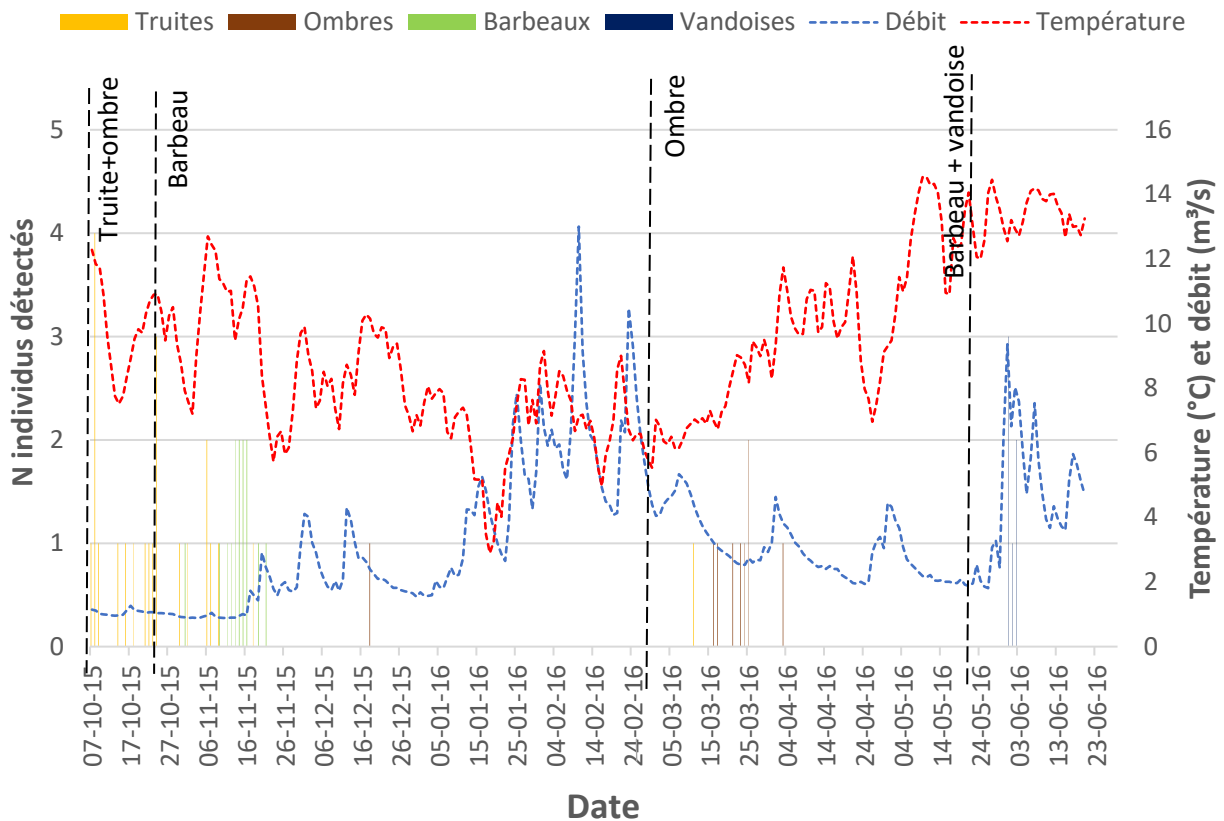


Figure 19 : Nombres d'individus détectés par semaine au niveau des antennes RFID de l'échelle à poissons selon les différentes espèces. Déversement de truites et ombres le 7/10/15, déversement de barbeaux et hotus le 26/10/15, déversement de truites et ombres le 01/03/16 et déversement de barbeaux et vandoises le 18/05/16

3.2.3. Rythmes de détections à l'échelle nycthémerale

On remarque que les patrons d'activités nycthémerales au niveau de l'antenne 1 sont différents en fonction des espèces (figure 20). Les truites sont détectées à toutes les heures du cycle nycthémerale, néanmoins elles présentent un pic d'activité nocturne (60% : 20h à 7h). Les ombres présentent un pic de détections diurne (80% : 10h- 19h). Bien que les barbeaux soient détectés sur tout le cycle nycthémerale, on observe deux pics de présence (19% : 6h-9h et 31% : 17-20h), ce qui correspond respectivement au lever et au coucher du soleil (phases crépusculaires). Concernant les vandoises, la période de détections se déroule également sur toutes les heures du cycle nycthémerale cependant son pic de détections le plus important se situe en fin de nuit de 5h à 7h (32%).

A1

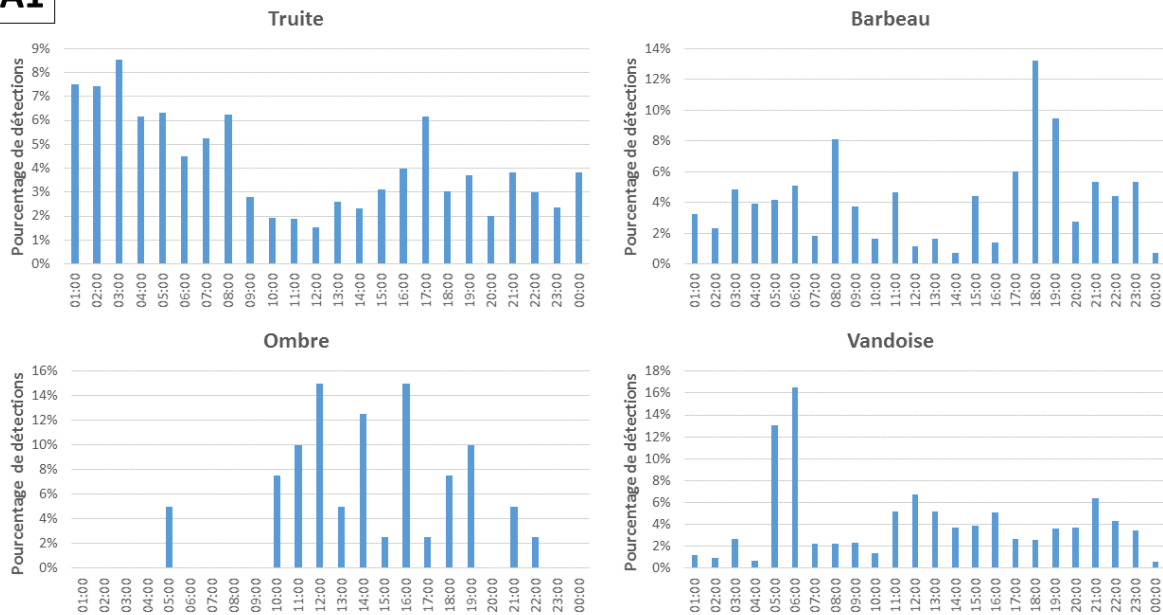


Figure 20 : Pourcentage de détections totales à l'antenne RFID **A1 (partie aval)** de l'échelle à poissons par rapport au nombre de détections totales en fonction de l'heure pour chaque espèce : truite ; ombre ; barbeau et vandoise

Les résultats à l'antenne 2 montrent quelques différences (figure 21). Les truites sont principalement détectées au niveau de l'antenne en fin de soirée et en début de nuit (51% de 19h à 23h) mais elles restent active à cette antenne A2 tout le cycle nyctéméral. Pour les ombres, l'ensemble des détections est observée en journée de 7h à 19h (93%) avec un pic de 46% en début de matinée de 7h à 9h. Les barbeaux et les vandoises présentent un schéma de détections quelque peu similaire à la truite avec une activité nocturne plus importante chez ces deux espèces (20h à 6h) et la présence de détection en journée.

A2

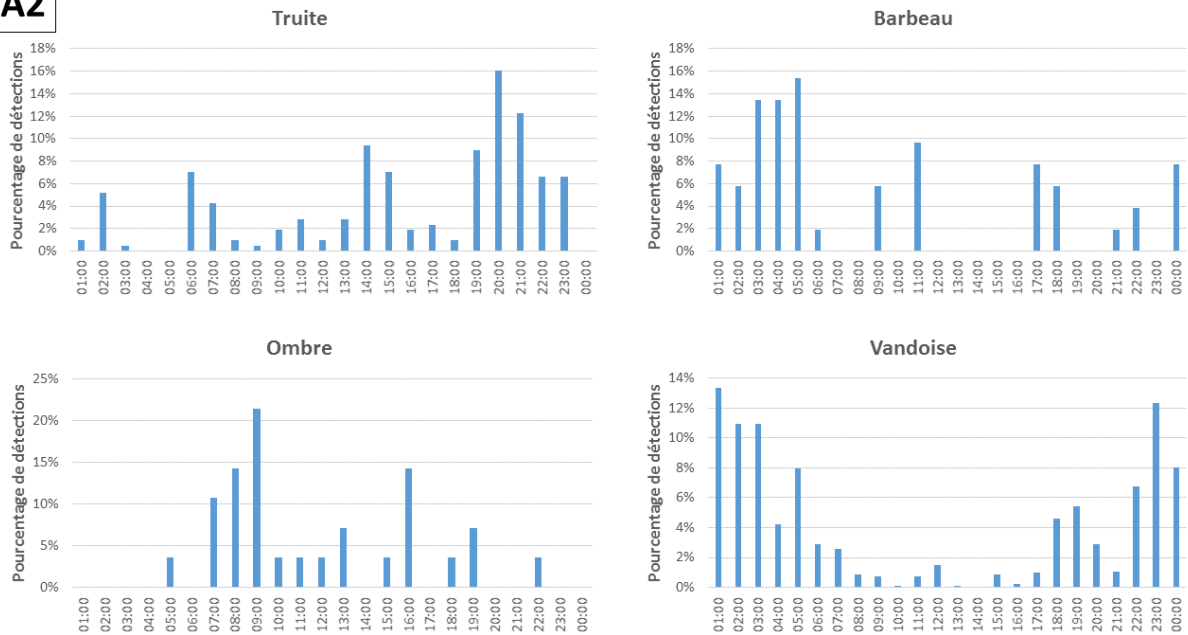


Figure 21 : Pourcentage de détections totales à l’antenne RFID **A2 (partie centrale)** de l’échelle à poissons par rapport au nombre de détections totales en fonction de l’heure pour chaque : truite ; ombre ; barbeau et vandoise

On remarque en premier lieu pour les détections à l’antenne 3 de l’échelle à poissons (figure 22), que la vandoise n’apparaît plus, ces dernières n’ont pas été détectées à cette antenne. Le seul barbeau détecté à l’antenne A3 l’a été à 5h. Les ombres présentent un pic de détection de 74% en fin d’après-midi entre 16h et 17h. Enfin les truites sont détectées principalement en journée (80% de 10 à 18h) contrairement aux détections nocturnes des deux autres antennes aval. Cette modification des rythmes de détection n’est pas liée à un seul individu qui serait resté dans la zone de détection un long moment en journée. La raison de cette variation des rythmes de détections au sein de l’échelle à poissons pour les truites peut être affinée par l’étude des heures de première détection en A1 et de dernière détection en A3 lors d’un franchissement (figure 23). Lors de cette analyse on observe en fait que la majorité (87%) des franchissements est effectuée durant la journée (9h à 18h).

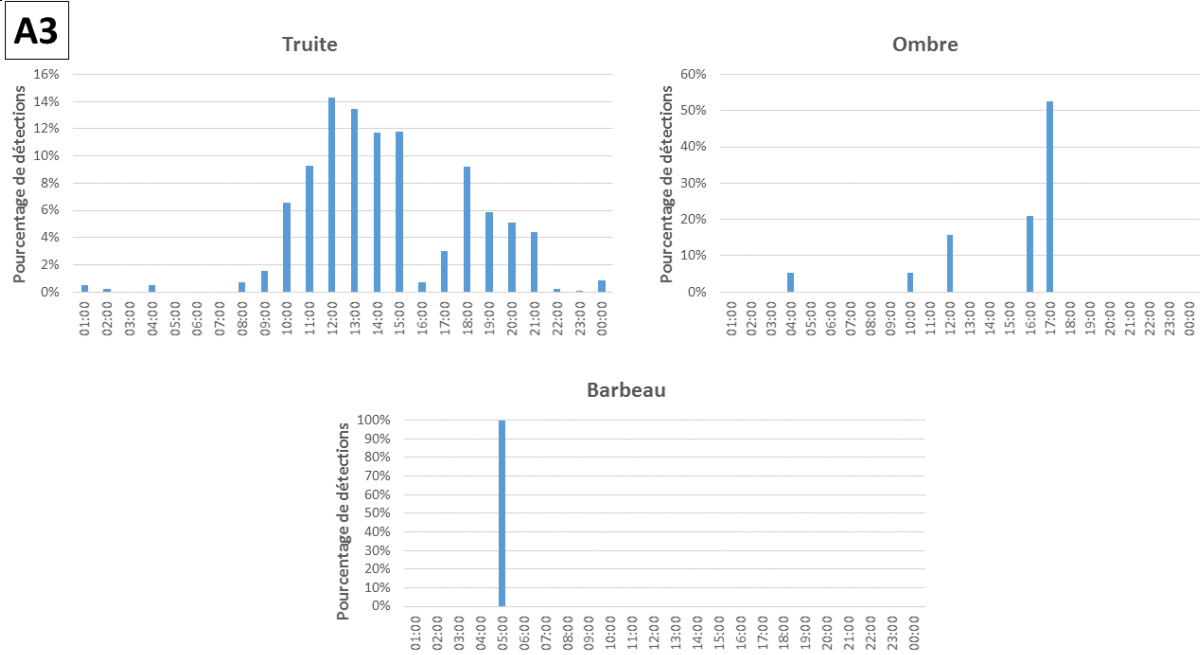


Figure 22 : Pourcentage de détections totales à l'antenne RFID **A3 (partie amont)** de l'échelle à poissons par rapport au nombre de détections totales en fonction de l'heure pour chaque espèce : truite ; ombre ; barbeau et vandoise

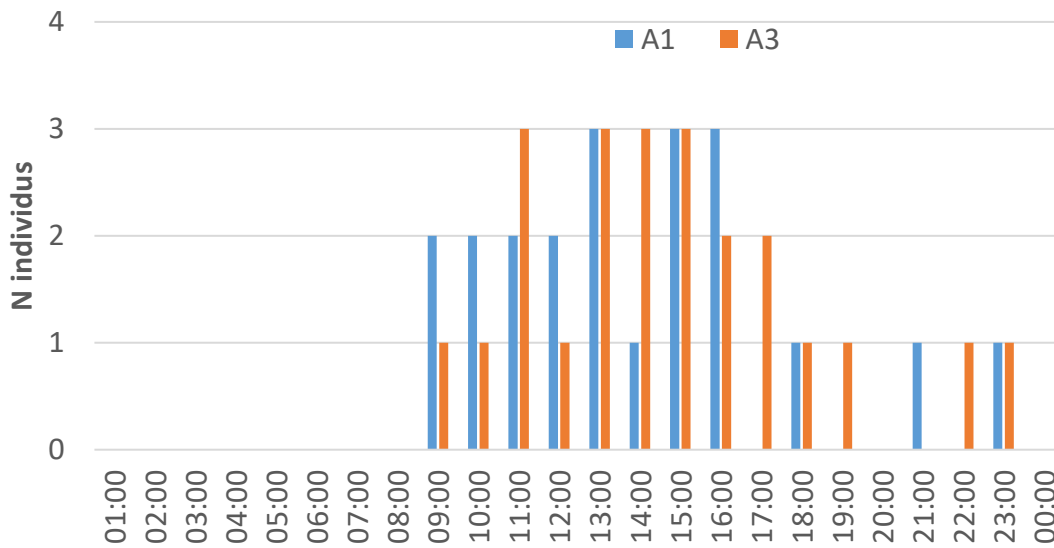


Figure 23 : Heure de la première détection à l'antenne aval de l'échelle à poissons (A1) et de la dernière détection en amont (A3) lors d'un franchissement de l'échelle à poissons par les truites

3.2.4. Analyse des comportements de poissons à l'approche et au sein de l'échelle à poissons

Après leur première détection à l'entrée de l'échelle, on constate que les comportements d'approche sont différents (figure 24). Les salmonidés, avant franchissement, réalisent majoritairement une ou deux approche(s) de l'entrée de la passe avec N=19 truites (sur 20 individus) et N=4 ombres (sur 5 individus). Lorsque ces deux espèces ne franchissent pas l'échelle, le nombre d'approche n'augmente pas (χ^2 , $p < 0,001$). En effet, seul N=1 truite (sur 7 salmonidés) a effectué plus de deux approches. Parmi les cyprinidés détectés, barbeau et vandoise, un seul barbeau a réalisé un franchissement mais il a préalablement effectué 3 approches de l'entrée de l'échelle à poissons. Pour les individus détectés sans franchissement, ce nombre d'approches est également plus important avec 3 approches ou plus pour N=11 barbeaux (sur 13 individus) et N=3 vandoises (sur N=6 individus).

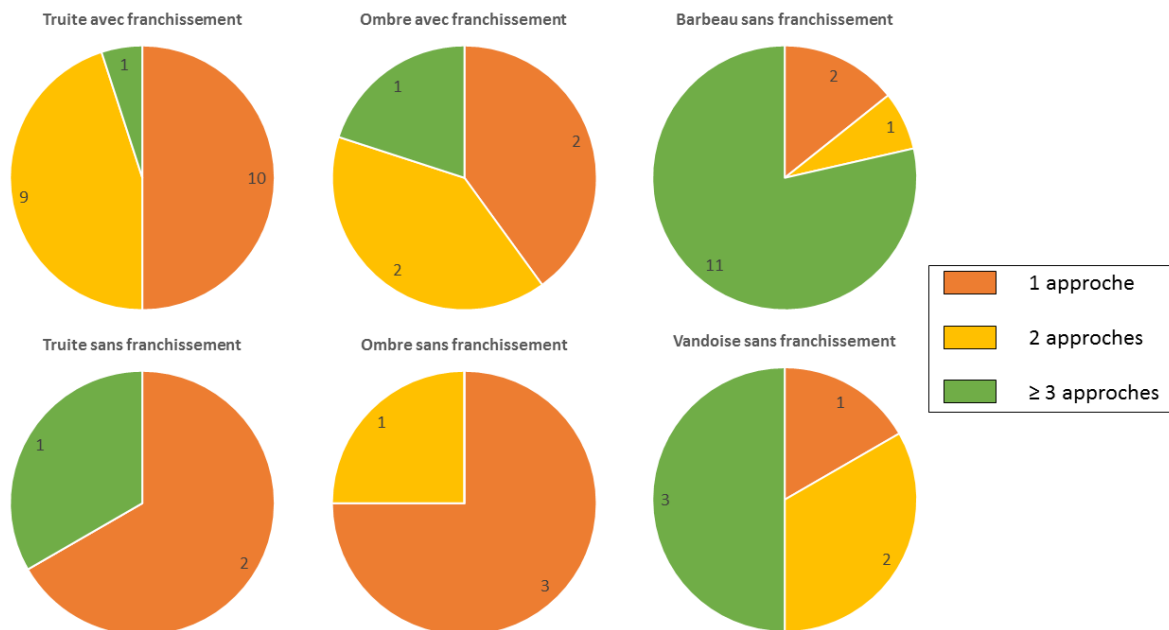


Figure 24 : Comportements d'approche de l'échelle à poissons des différentes espèces avec ou sans franchissement.

Parmi tous les individus qui n'ont pas franchi l'échelle à poissons, il apparaît que (tableau 6):

- N= 3 truites (6% des truites marquées) ont été détectées à différents niveaux de l'échelle sans la franchir. Ainsi, N=1 individu est monté jusque l'antenne 1, N=1 jusque

l'antenne 2 et N=1 jusque l'antenne 3 pour ensuite faire demi-tour et retourner vers l'aval du barrage.

- N= 4 ombres (9% des ombres marqués) ont été détectés au sein de la passe à poissons mais sans franchissement. N=3 sont détectés le plus en amont à l'antenne 1 et N=1 à l'antenne 2.
- N= 13 barbeaux (38% des barbeaux marqués) ont été détectés au sein de l'échelle à poissons sans réaliser de franchissement. N=5 sont détectés le plus en amont à l'antenne 1 et N=8 à l'antenne 2. Il est important d'ajouter que 93% de barbeaux n'ont pas franchi l'échelle sur tous les individus détectés.
- Sur les N=6 vandoises détectées, la détection la plus amont observée se situe à l'antenne 2 pour n=4 individus et les deux derniers individus ont été détectés uniquement à l'antenne 1.
- Aucune détection n'a été observée à l'antenne 4 installée au niveau de l'orifice de fond le plus en amont dans l'échelle à poissons.

Tableau 6 : données de détections RFID par espèces pour les individus qui n'ont pas franchi l'échelle incluant le nombre de poissons détectés le plus en amont par antenne. Les nombres entre parenthèses correspondent aux individus doublement marqués (RFID et radio)

Espèces	N détectés	N sans franchissement	% non franchissement	N détectés jusque A1	N détectés jusque A2	N détectés jusque A3	N détectés jusque A4
<i>Salmonidés</i>							
Truite	23 (4)	3 (2)	13%	1	1	1	0
Ombre	9 (4)	4 (2)	44,5%	3	1	0	0
<i>Cyprinidés</i>							
Barbeau	14 (0)	13	93%	5	8	0	0
Hotu	0	0	-	0	0	0	0
Vandoise	6	6	100%	2	4	0	0
Total	52	26		11	14	1	0

Les comportements des individus qui n'ont pas franchi l'échelle à poissons peuvent être divisés en trois catégories (figure 25) : ceux qui ont réalisé uniquement une approche ou plus de l'entrée de l'échelle à poissons, ceux qui ont effectué un franchissement partiel (détection max. antenne 2 puis dévalaison) et ceux qui ont fait un aller-retour (détection max. antenne 3 puis dévalaison). Ainsi on remarque que ce sont majoritairement les cyprinidés avec les barbeaux (N=8) et les vandoises (N=5) qui réalisent des franchissements partiels. N=5 barbeaux ont uniquement réalisé une ou plusieurs approches de l'entrée de la passe. Seule une truite a effectué un aller-retour.

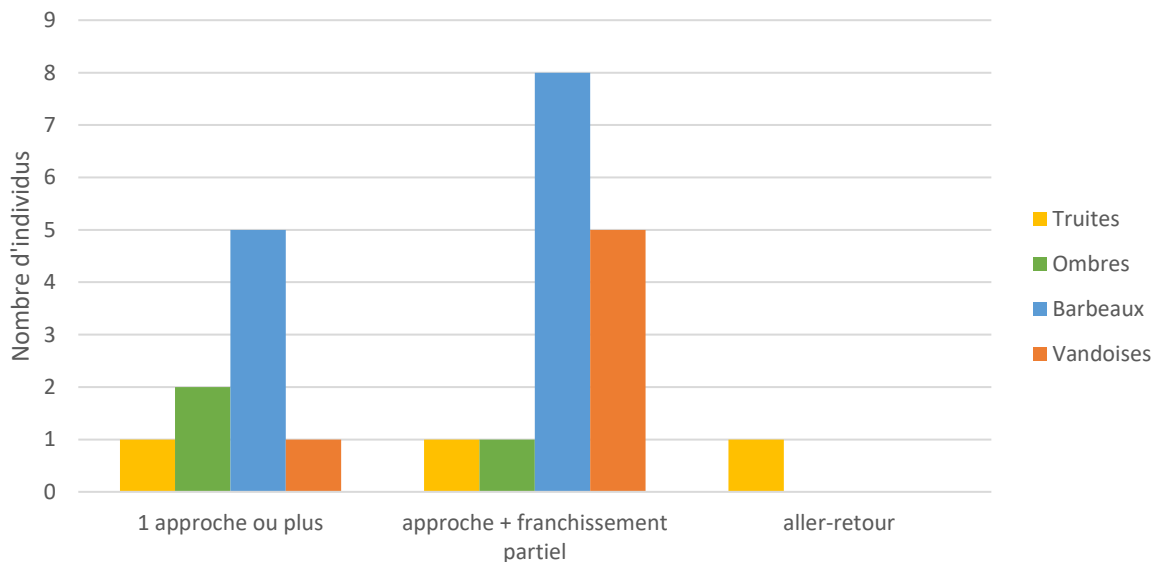


Figure 25 : Comportements observés au sein de l'échelle pour les individus sans franchissement

Concernant les comportements des poissons après leur franchissement de la passe migratoire, il peut y avoir différentes possibilités (figure 26). On remarque que N=13 truites (sur 20 individus qui ont franchi) ont poursuivi leur migration en amont dans le Bocq. En revanche, N= 4 truites ont dévalé via l'échelle à poissons puis N=3 ont effectué de nouveau un ou plusieurs franchissement. La majorité des ombres (N= 3) est restée dans le secteur amont. Cependant, certains poissons ont dévalé via le barrage (pas de détection en dévalaison) puis ont réalisé une approche de l'échelle sans effectuer de franchissement (N=2 truites et N=1 ombre) et N=1 ombre a franchi le barrage par l'échelle à poissons. Le seul barbeau qui avait franchi le barrage via l'échelle à poissons a dévalé via cette dernière par la suite.

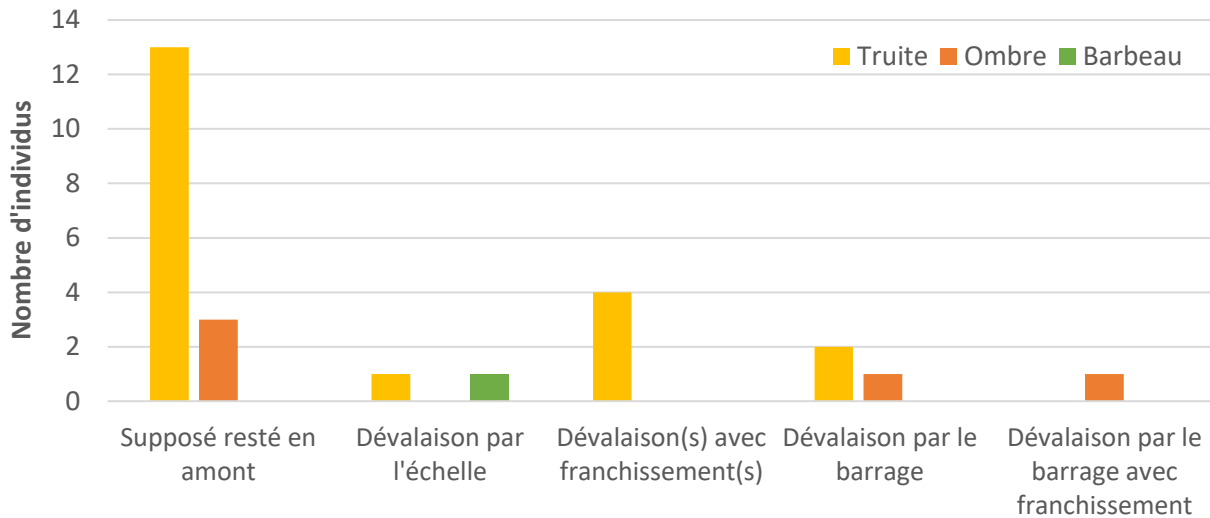


Figure 26 : Comportement des individus après franchissement de l'échelle à poissons.

L'analyse des comportements observés au sein de l'échelle (franchissement, franchissement partiel, aller-retour et approche) selon les débits du Bocq (module=2,2m³/s) montre plusieurs tendances selon l'espèce (figures 27 et 28) :

- Pour la truite, les franchissements se déroulent de 0,9m³/s à 4,3m³/s avec une valeur médiane de 1,1m³/s. Les comportements uniquement d'approche ont été observés de 0,9m³/s à 6,8m³/s. Les comportements qui peuvent être qualifiés d'hésitations sont les franchissements partiels et les allers-retours tout deux observés à deux reprises à respectivement de 1m³/s à 9,3m³/s et de 1,1m³/s à 1,7m³/s.
- Pour l'ombre, un seul franchissement a été observé hors période de reproduction parmi les poissons marqués et déversés en octobre 2015. Ce franchissement du 18/12/15 s'est déroulé lorsque le débit du Bocq était de 2,4m³/s. Les autres franchissements se sont déroulés au printemps lorsque le débit était compris de 2,7m³/s à 3,7m³/s. Les comportements d'approches ont été observés de 2,7m³/s à 5,4m³/s. Enfin les comportements de franchissement partiel se déroulent lorsque le débit était compris de 2,5m³/s à 3,2m³/s.
- Le seul comportement de franchissement pour les barbeaux a été observé le 18/11/15 lorsque le débit du Bocq était de 1,6m³/s. Les comportements d'approches sont bien plus nombreux que les autres espèces et ils sont observés de 0,9m³/s à 8,1m³/s. Les 10 franchissements partiels répertoriés se sont produits lorsque le débit était de 0,9m³/s à 2,9m³/s.

- Aucune vandoise n'a réalisé un franchissement de l'échelle à poissons. Les détections au sein de l'échelle se sont déroulées du 31/05/2016 au 22/06/2016 lorsque pour une grande partie de la période de détection, l'échelle à poissons était partiellement colmatée (du 3 au 24/06/2016) ce qui rendait le franchissement complet impossible. Les comportements d'approches se sont déroulées lors d'une phase de crue début juin lorsque le débit était compris de 3,7m³/s à 9,4m³/s. Les comportements de franchissements partiels sont également observé dans la même gamme de débit de 3,6m³/s à 8m³/s.

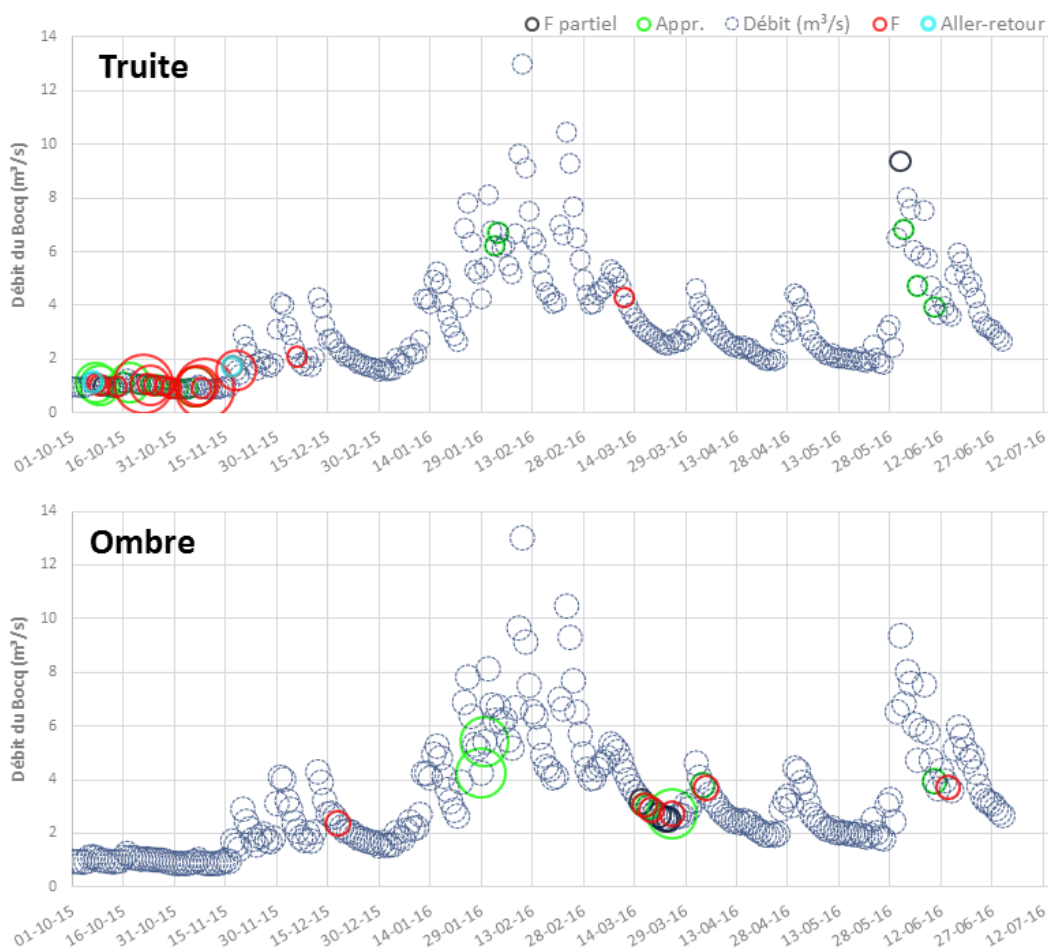


Figure 27 : Analyse de l'abondance (taille des bulles) des comportements observés pour les salmonidés (F partiel = franchissement partiel ; F=franchissement ; Appr.=approche et Aller-retour) au sein de l'échelle à poissons du barrage du Maka en fonction de la date et du débit (m³/s) du Bocq

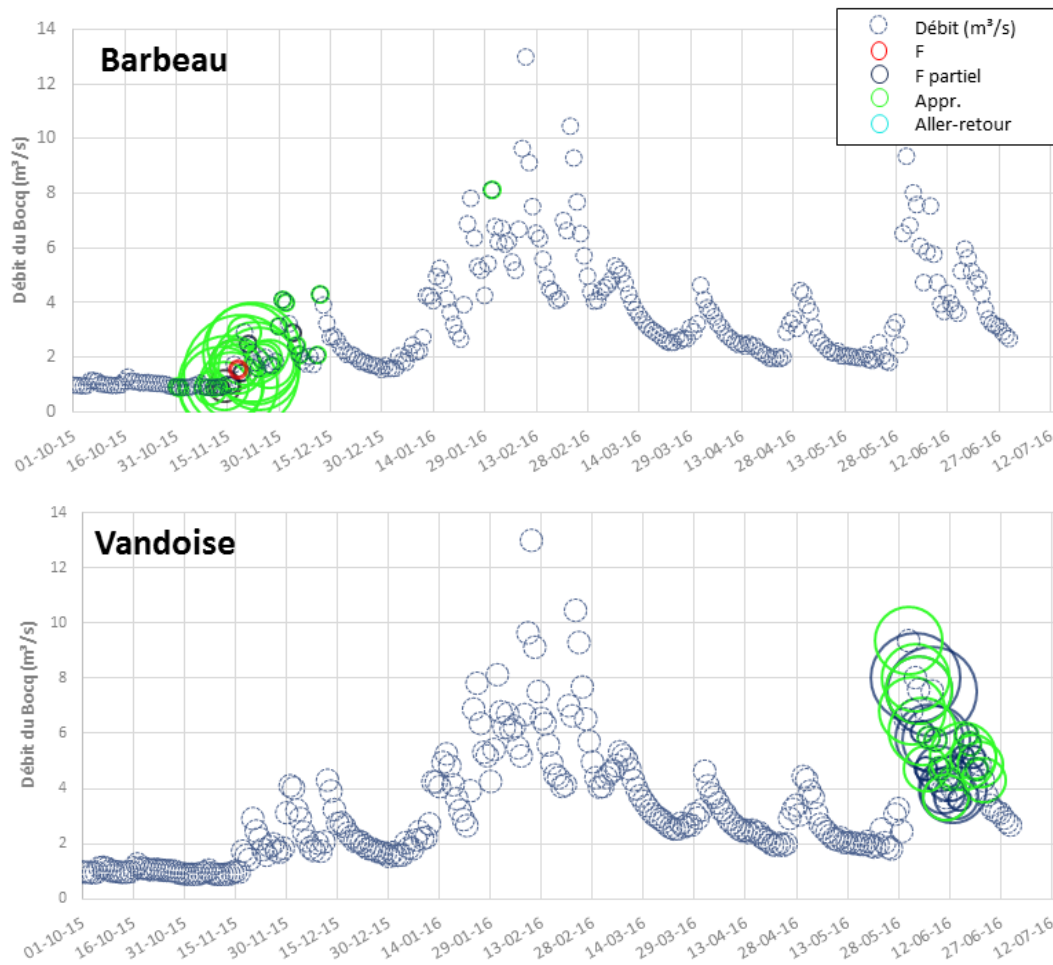


Figure 28 : Analyse de l'abondance (taille des bulles) des comportements observés pour les cyprinidés (F partiel = franchissement partiel ; F=franchissement ; Appr.=approche et Aller-retour) au sein de l'échelle à poissons du barrage du Maka en fonction de la date et du débit (m^3/s) du Bocq

3.2.5. Durées de franchissement de l'échelle à poissons

Lors des différents franchissements observés uniquement chez la truite, l'ombre et le barbeau, les temps de franchissement complets entre les antennes A1 et A3 (entrée aval et sortie amont de l'échelle) ont été calculés (tableau 7) :

- La durée de franchissement moyenne pour la truite est de 1h15 avec un minimum de 21min et un maximum de 5h39 (temps médian = 47min).
- Pour l'ombre, le temps moyen de parcours de l'échelle est de 1h59 avec un minimum de 38min et un maximum de 2h13 (temps médian = 1h52).
- Enfin pour le barbeau, un seul individu a franchi entièrement l'échelle. Le temps de franchissement est relativement long avec une valeur de 26h.

Le temps mesuré entre la première et la dernière détection à l'antenne amont A3, nous permet d'observer si le poisson présente une certaine réticence à quitter l'échelle à poissons et si ce dernier y transite facilement. Nous observons que les salmonidés quittent rapidement

l'échelle à poissons avec un temps de latence de 24min en moyenne pour les truites (temps médian de 1min41s) et de 16min pour les ombres (temps médian de 6s). Quant au barbeau, son temps de latence est de 23min pour sortir de la passe. Il n'existe pas de corrélation entre les durées de franchissement complet de l'échelle à poissons et la taille des individus (truites et ombres) (Spearman, $p=0,404$ pour la truite ; $p=0,75$ pour l'ombre). Aucune différence significative des temps de franchissement n'est visible entre les truites et les ombres (Mann-Whitney ; $p\text{-value}= 0,1938$). Enfin, aucune corrélation significative n'a été observée entre le temps de franchissement et le débit du Bocq (Spearman, $p>0,05$).

Tableau 7 : Durée de franchissement, transit et latence en hh:mm:ss des individus qui ont été détectés au sein de l'échelle à poissons. *valeurs de 0 car une seule détection observée

Distance	Temps	Salmonidés		Cyprinidés		
		Truite	Ombre	Barbeau	Vandoise	Hotu
Antenne 1 à 3 (franchissement)	N	20	5	1		
	Moyen	01:15:00	01:59:44	26:05:55	/	/
	Médian	00:47:45	01:52:46	26:05:55	/	/
	Min	00:21:21	00:38:58	26:05:55	/	/
	Max	05:39:43	02:13:41	26:05:55	/	/
Antenne 1 à 2 (transit)	N	22	6	15	4	
	Moyen	00:25:14	00:14:06	05:19:40	00:38:14	/
	Médian	00:11:37	00:12:04	03:28:19	00:17:17	/
	Min	00:03:11	00:02:22	00:32:13	00:03:35	/
	Max	03:00:49	00:33:14	13:56:22	01:41:09	/
Antenne 2 à 3 (transit)	N	21	5	1		
	Moyen	00:27:24	00:40:47	11:07:33	/	/
	Médian	00:21:18	00:43:09	11:07:33	/	/
	Min	00:12:15	00:11:21	11:07:33	/	/
	Max	01:13:18	01:05:29	11:07:33	/	/
Antenne 3 à 3 (de sortie)	N	20	5	1		
	Moyen	00:24:27	00:15:53	00:22:50	/	/
	Médian	00:01:41	00:00:06	00:22:50	/	/
	Min	00:00:00*	00:00:00*	00:22:50	/	/
	Max	04:53:50	01:03:20	00:22:50	/	/

3.3. Mesures hydrauliques (V, H, dH) au sein de l'échelle à poissons

A l'aide d'un courantomètre, nous avons mesurés plusieurs vitesses de courant (V) (figure 29) ainsi que des hauteurs de charge (H) au sein de chaque échancrure de l'échelle à poissons le 25 juillet 2016 (débit=2,5m³/s). Dans l'optique de vérifier si les jets entre les bassins suivent les recommandations du guide ICE (Baudoin et al., 2014), nous avons mesuré des hauteurs de chutes (dH) entre les différents bassins de l'échelle à poissons le 15 septembre 2016 alors que le débit était de 1,15m³/s (tableau 8).

Les résultats montrent, comme observé lors du programme Walphy, un gradient de vitesse croissant de l'aval vers l'amont : moyennes de 0,99 à 1,94 m/s (min=0,75m/s et max=2,01m/s). En ce qui concerne les mesures de charge (H) au niveau de l'échancrure et de hauteur de chute (dH) entre les bassins, elles sont constantes avec respectivement une moyenne de 0,67m (hauteur de lame d'eau dans l'échancrure) et 0,22m (hauteur de chute d'eau entre deux bassins). Selon le guide ICE (Baudoin et al., 2014), il s'agit bien d'un jet de surface ($DH \leq 0,5 * H$) pour chaque échancrure, ce qui correspond à des conditions optimales pour les espèces non sauteuses. Cependant ces données (V, H et dH) ont été prises à des périodes différentes.

Tableau 8 : Vitesse de courant au niveau des différentes échancrures de l'échelle à poissons du barrage du Maka avec les valeurs moyennes, minimum et maximum en m/s ainsi que les valeurs de colonne d'eau (H) et de chutes d'eau (dH) entre les bassins

N° échancrure	Antenne	Vitesse de courant (m/s)			H (m)	dH (m)
		Moyenne	Min.	Max.		
<i>Aval</i>						
1	A1	0,99	0,75	1,28	0,78	-
2		1,35	1,29	1,52	0,64	0,17
3	-	1,5	1,37	1,76	0,65	0,23
4	A2	1,48	0,8	1,77	0,62	0,23
5	-	1,67	1,48	1,8	0,65	0,22
6	-	1,6	1,5	1,69	0,65	0,29
7	-	1,64	1,5	1,74	0,68	0,21
8	A3	1,94	1,83	2,01	0,7	0,22
<i>Amont</i>						



Figure 29 : Vue aval d'une échancrure amont (n°6, tableau 8) de l'échelle à poissons du barrage du Maka

4. Discussion

Ce rapport est une contribution aux développements des connaissances sur l'évaluation de l'efficacité de l'échelle à poissons du Maka et sur les profils migratoires de certaines espèces piscicoles du Bocq. Cette étude s'intègre dans des projets de rétablissement de la libre circulation des cours d'eau wallons, menés sur le Bocq avec le projet Life "Walphy". Suite à l'installation simultanée de la microcentrale hydroélectrique (financement privé) et de la passe à poissons en 2011 (Projet Walphy) sur le barrage du Maka, une première évaluation de l'efficacité de l'échelle à poissons a été effectuée début 2013 via un piège de capture. Cependant, ce monitoring s'est montré peu fructueux avec la capture de 25 individus en 4 mois de suivi (Verniers et Peeters, 2013 : rapport Walphy). Ce faible taux de capture est certainement lié au colmatage récurrent observé lors du monitoring. Dans le but de mieux définir l'évaluation de l'efficacité de l'échelle à poissons, notre expérimentation s'est déroulée d'octobre 2015 jusque fin juin 2016. Durant cette période, la configuration du site (complexe barrage du Maka – échelle à poissons – vis d'Archimède) a peu varié tout au long de l'étude. Les seules variations ont été un épisode de crue (31 mai au 1^{er} juin 2016) avec des conditions de débits très importantes (>9m³/s) et une turbidité de l'eau très élevée. Un premier passage à sec de la passe à poissons a également eu lieu suite à cette crue en juin, causée par l'accumulation de débris à l'entrée amont. De la même manière, un second passage à sec de la passe a été observé à la mi-juin. Signalons que pendant toute la durée de l'expérimentation, **la vis d'Archimède n'a pas fonctionné**. Sa mise en route a été effective à la fin juin 2016 lorsque les suivis s'achevaient. Il en résulte que l'attractivité de l'échelle à poissons mesurée dans cette étude n'est pas représentative des conditions normales de fonctionnement du complexe barrage – échelle à poissons – vis d'Archimède.

4.1. Efficacité des méthodes utilisées

Au cours de ce projet, plusieurs méthodes de manipulation-transfert des poissons et de monitoring ont été utilisées. Des pêches électriques ont été réalisées le plus souvent en amont du barrage (une seule réalisée en aval) pour effectuer des captures de poissons, marquages et translocation en aval de la zone du barrage du Maka en espérant un retour en amont par « homing ». La technique de translocation a plus de chance d'être efficace si les individus sont transloqués peu de temps avant leur période de reproduction dans des conditions où les variables environnementales sont propices à la migration de reproduction vers l'amont (Ovidio et al., 2016a). Certaines tentatives de translocations ont donc été infructueuses, notamment celles de poissons de pisciculture qui n'ont jamais connu de rivière et qui ont

certainement subi de trop grosses variations de leur milieu de vie. De plus, le déversement de ces poissons ne s'est pas effectué durant leur période de migration de reproduction. Pour les salmonidés du Pacifique par exemple, il existe des preuves que les conditions d'élevage en captivité sélectionnent par inadvertance des traits comportementaux et morphologiques qui ne sont pas optimaux dans la nature (Reisenbichler et McIntyre 1977). Enfin le marquage d'individus naturellement présents dans le tronçon aval du barrage, uniquement des cyprinidés (barbeau, hotu et vandoise) n'a pas donné suite à de nombreuses détections. Cette faible présence au sein de l'échelle à poissons peut se justifier par le fait que le Bocq est plutôt une rivière salmonicole, moins attractive pour les cyprinidés, même rhéophiles. En effet les habitats disponibles en amont du barrage sont plus propices à des espèces de la zone à truite et ombre (Huet, 1949). Au final c'est la translocation amont Maka vers aval Maka de salmonidés capturés juste avant la reproduction qui s'est révélée la technique la plus efficace pour forcer des mouvements vers l'amont. Parmi les hypothèses qui peuvent expliquer l'absence de détection d'un certain nombre d'individus marqués notons la capture par des prédateurs ou des pêcheurs. Ce fut le cas d'au moins une truite, dont l'émetteur radio nous a été rendu par le président de la société de pêche bien que la zone aval du barrage représente une zone interdite de pêche (observations sur place de plusieurs pêcheurs). Il se peut aussi que des individus qui ne trouvent pas l'entrée de la passe finissent par effectuer un déplacement vers l'aval afin de rechercher un site de reproduction ou un habitat alternatif comme démontré dans d'autres études (Ovidio et al., 2016a), ce qui diminuerait le taux de détection des poissons marqués à l'entrée de la passe.

Le système de détection RFID est largement utilisé pour étudier les mouvements des poissons. La miniaturisation et le faible coût des marques permet de réaliser des études quantitatives, tout en conservant le caractère individuel des analyses (Prentice et al., 1990, Castro-Santos et al, 1996 ; Armstrong et al, 1996. ; Greenberg & Giller, 2000). Cette technique a le grand avantage de permettre la collecte de données sans recapter l'animal, évitant ainsi le stress causé par la manipulation (Prentice et al., 1990). Cette méthode est particulièrement importante lorsque l'on étudie les performances de passage au sein des passes migratoires et a été démontré pour être une méthode efficace pour quantifier les passages (Castro-Santos et al., 1996, Ovidio et al. 2016b). La configuration du site d'étude ainsi que les résultats peu fructueux obtenus par le passé via un piège de capture nous ont confortés dans le choix de cette technique de suivi comportemental. L'inconvénient de la télémétrie RFID est que seuls les individus marqués sont détectés, ce qui ne permet pas d'avoir une vue complète des flux migratoires à l'intérieur de la passe. Avec un champ de détection plus important, l'utilisation de la technologie radio complémentaire aux suivis RFID permettrait d'acquérir des données

comportementales avant l'arrivée du poisson à l'entrée de l'échelle. Bien que malgré quelques légers dysfonctionnements des deux systèmes de détection, ceux-ci n'ont pas engendré de grosses perturbations dans l'acquisition et l'analyse des résultats.

4.2. Rythmes saisonniers au niveau du complexe barrage du Maka – Echelle à poissons

Suite aux différentes translocations et/ou déversements réalisés, la date de première détection RFID des individus est rapide après le marquage. Quatre principaux pics saisonniers ressortent : deux en automne, un en hiver et un au printemps, et ce, dans des gammes diverses de température et de débit. Le pic hivernal de détection de truites suite à la translocation du 07/10/15 correspond à leur période de migration de reproduction durant laquelle les individus matures recherchent habituellement un habitat pour frayer vers l'amont (Ovidio et al., 1998 ; Heggenes et al., 2007). Les mouvements saisonniers de cette espèce ont été démontrés dans plusieurs études grâce à des expériences de radio-télémetrie ou de contrôles de passes migratoires (Ovidio, 1999 ; Benitez et al., 2015).

Le second pic observé en hiver est celui des barbeaux de pisciculture, ces déplacements peuvent correspondre à une recherche d'habitats de refuges thermique ou de nourriture (Elliot 1994 ; Baras, 1995 ; Ovidio et al., 2007 ; Benitez et al., 2015). En effet, cette espèce a une période de reproduction printanière, ce qui correspond avec les résultats de première détection des barbeaux transloqués le 18.05.16 (Baras et al., 1994 ; Britton and Pegg, 2011). Ce qui expliquerait le faible nombre d'individus détectés suite au déversement du 26.10.15. Les ombres présentent une période de migration de reproduction également au printemps, ce qui correspond au nombre plus élevé d'individus détectés à la mi-avril (Bardonnnet et Gaudin, 1991; Ovidio et al., 2004). Les détections des ombres en période automnale et celles de la truite au printemps montrent des déplacements qui peuvent correspondre à des déplacements de recherches d'habitats de refuge ou d'alimentation vers le tronçon amont du barrage du Maka (Elliot 1994 ; Baras, 1995; Ovidio et al., 2007) et non nécessairement associés à la migration de reproduction (Benitez et al., 2015).

La période de détection des vandoises (en juin) était proche de sa période de migration de reproduction qui a lieu entre mars et juin (Benitez et al., 2015). Malheureusement, le fait qu'aucun franchissement n'ait été constaté, est probablement lié à un colmatage en amont de l'échelle qui a mis la passe à sec durant la période de détection observée. Dans son environnement naturel, le hotu est une espèce qui migre principalement vers l'amont pour frayer et effectue plus tard une dévalaison post-reproduction avec des mouvements vers aval (Hubert et Kirchhofer, 1998; Ovidio et Philippart, 2008). Cela n'était pas le cas dans notre

étude, avec des individus issus de pisciculture qui n'ont pas dû avoir le même comportement que leurs homologues sauvages. Néanmoins, un petit nombre de hotus sauvages (N =4) a été marqués en aval du barrage lors de la pêche du 18.05.16 (présence abondante en aval) et aucun n'a été détecté au sein de l'échelle à poissons.

4.3. Rythme nycthéral de détection au sein de l'échelle à poissons

Il apparaît clairement que les rythmes nycthéraux au sein de l'échelle à poissons peuvent être différents selon l'espèce. Détectées tout au long du cycle nycthéral, les truites ont une activité majoritairement nocturne lors de leur passage au sein de l'échelle à poissons ce qui correspond à leur rythme naturel (Ovidio et al., 1999 et 2015). Cependant, un décalage des rythmes de détection à l'échelle journalière a été observé au niveau de la partie amont de l'échelle à poissons avec une activité principalement diurne. Cette variation de la période d'activité s'explique par le fait que les franchissements se produisent majoritairement la journée, contrairement aux comportements d'approches de l'entrée de l'échelle. A l'inverse, l'ombre présente une activité diurne au sein de l'échelle à poissons. Ces données d'activité à l'échelle nycthérale sont peu connues pour l'ombre mais cette activité diurne a déjà été observée sur l'Amblève à Coë (Ovidio et al., 2015). Enfin, les données de détection pour les cyprinidés, nous permettent d'observer des rythmes d'activité crépusculaire et/ou nocturne pour le barbeau et la vandoise avec un pic aux périodes crépusculaires pour le barbeau comme observé en milieu naturel (Baras et al., 1992).

4.4. Etude de l'efficacité de la passe à travers nos modèles biologiques

Il existe une succession d'étapes distinctes pour le franchissement d'une passe migratoire : les poissons doivent d'abord localiser l'entrée de la passe (orientation), une fois dans la zone d'attraction de la passe, ils doivent choisir d'y entrer et enfin ils doivent franchir complètement le barrage via la passe à poissons. L'analyse comportementale au cours des trois étapes, l'orientation (temps de recherche), l'entrée (taux d'attractivité) et le passage (taux et temps de franchissement), permet de mieux cerner l'efficacité globale d'une passe migratoire (Collins et Elling, 1960; Bunt et al., 2012). Souvent, il est impossible de quantifier séparément les trois étapes, et les chercheurs doivent reconnaître les limites de leur étude et interpréter leurs données en conséquence (Bunt et al., 2012). Au cours de notre étude, le dispositif mis en place nous a permis d'analyser les trois étapes.

4.4.1. Taux d'attractivité et temps de recherche de l'entrée de l'échelle à poissons

Le suivi radio-téléométrique au pied du barrage du Maka a permis d'acquérir des informations très utiles sur les poissons doublement marqués (N=24 au total) qui se sont approchés de la zone aval barrage–turbine–échelle à poissons. La totalité des individus radio-marqués (100%) a effectué une approche du complexe dans les jours qui ont suivis leur déversement (<1j à 14j). Ces résultats indiquent que les poissons radio-marqués ont conservé un comportement exploratoire après leur marquage. Ces résultats sont en adéquations avec les résultats d'études de la passe à poissons de Chancy-Pougny (88%) et de la passe à poissons de Verbois installées sur le Rhône (78%) (Programme Interreg IVA France-Suisse : Grimardias et al., 2015) obtenus avec des suivis de barbeau, chevaine et de truites. Grâce à la combinaison des systèmes de détection radio et RFID, le taux d'attraction global de l'échelle à poissons a été évalué à 33% (40% des truites, 40% des ombres et 0% des barbeaux). Le temps de recherche nécessaire aux poissons pour trouver l'entrée de l'échelle est en moyenne de 65h pour les truites et de 542h pour les ombres (temps médians respectifs : 12h et 465h). Il est important d'ajouter qu'aucun des 4 barbeaux doublement marqués n'a été détecté à l'entrée de l'échelle à poissons. A titre de comparaison, des temps de présence dans la zone aval du barrage, avant de trouver l'entrée de l'échelle, ont été calculés sur des barbeaux, des chevaines et des truites, pour les échelles de Chancy-Pougny et de Verbois sur le Rhône. Ainsi, le premier site d'étude indique un temps de 240h contre 234h pour le second, toutes espèces confondues (Grimardias et al., 2015). Sur ces deux sites, la distance barrage – entrée de l'échelle est comprise entre 200 et 300m pour les deux sites.

Le taux d'attractivité lorsque l'on utilise les poissons uniquement marqués en RFID n'est pas aussi pertinent que celui des individus doublement marqués. Ce taux est représenté par le rapport du nombre d'individus détectés au sein de l'échelle à poissons et du nombre d'individus marqués. Bien que ce taux ne prenne pas en considération la présence ou non du poisson dans la zone aval du barrage, il nous permet d'observer plusieurs tendances. Dans un premier temps les truites, majoritairement marquées et déversées en automne (98%) lors de sa période de reproduction, possèdent un taux d'attraction de 49% qui est proche de celui observé par suivis radio (40%). Pour les ombres, ce taux d'attraction diminue à 20%. Cependant une grande proportion des ombres (75%) a été marquée et déversée en automne en dehors de leur période de reproduction. Pour ce marquage le taux d'attraction est de 3% alors que pour le déversement de printemps, il grimpe à 73%. Ce contraste s'explique certainement par l'absence de stimulation des ombres de se déplacer vers l'amont en

automne. Globalement le taux d'attraction de 21% calculé pour les cyprinidés est inférieur à celui des salmonidés (35%). A l'échelle de l'espèce, les différences sont importantes chez les cyprinidés. Le taux d'attraction est de 41% pour les barbeaux, de 21% pour les vandoises et de 0% pour les hotus. Bien que la majorité des hotus proviennent de pisciculture, de la même manière que certains barbeaux, nous supposons que la technique de marquage de poissons de pisciculture est peu adaptée à ce type d'étude et biaise l'interprétation des résultats globaux. Le marquage de certains individus sauvages (N=36) et leur faible présence au sein de l'échelle (17%) tendrait à indiquer que l'échelle est moins attractive pour les cyprinidés alors que leur présence s'est révélée importante, en particuliers pour le hotu, dans le secteur aval du barrage.

Il faut toutefois prendre en compte le fait qu'un poisson qui s'approche du barrage n'a pas obligatoirement la volonté de le franchir. En effet, au cours d'une telle expérience, il est difficile de prévoir le comportement que les individus auront après translocation et/ou déversement. Ainsi, malgré le fait que nous avons essayé de capturer et marquer les poissons dans les meilleures conditions possibles, afin de favoriser une remontée vers l'échelle, les chiffres d'attractivité qui sont avancés peuvent toujours être biaisés par la non motivation de certains individus à s'approcher du barrage et de la passe.

Même s'il existe des recommandations dans la littérature concernant le positionnement correct des entrées des passes migratoires, les contraintes locales (les routes, les chemins de fer) peuvent obliger les ingénieurs à adopter une conception moins appropriée. En ce qui concerne les barrages hydroélectriques, l'attractivité peut différer selon le nombre de turbines en fonctionnement et de leur position. Dans notre étude, durant la période de suivi, la vis d'Archimède ichtyocompatible située entre la passe à poissons et le barrage, ne fonctionnait pas. Son influence (normalement positive) vis-à-vis de l'attractivité de l'échelle n'a donc pas été considérée.

4.4.2. Taux et temps de franchissement

a. Taux de franchissement

Le dispositif RFID mis en place dans l'échelle du barrage, a permis une visualisation générale de l'utilisation de la passe par les individus marqués. Une partie des poissons marqués et a été volontairement exclue du calcul du taux général d'efficacité : les hotus de pisciculture et les vandoises. Cette exclusion a été effectuée pour ne pas biaiser les résultats étant donné leur absence totale ou leur incapacité d'effectuer un franchissement (échelle colmatée lors de la remontée de certaines vandoises). En excluant ces poissons, le suivi comportemental a révélé

que le pourcentage de franchissement total est de 20% et de 50% pour le franchissement corrigé. Les résultats de l'échelle à poissons du Bocq sont relativement proches de ceux observés sur le Rhône avec un résultat de 62,5% pour le franchissement corrigé, barbeaux et chevaines confondus, pour l'échelle à poisson de Chancy-Pougny (25% de franchissement total) tandis que celle de Verbois affichait 67% (11% de franchissement total) (Grimardias et al., 2015). Au sein de ces deux échelles installées sur le Rhône, le taux de franchissement corrigé est de 50% pour les barbeaux fluviatiles et ce taux de franchissement corrigé monte à 75% pour l'échelle à poissons du barrage de Monsin sur la Meuse en Belgique (Ovidio et al., 2016c). Ce qui est très élevé comparé au site du Maka où le pourcentage n'est que de 7% pour cette espèce. De plus, Noonan et al. (2012) signale que globalement le taux d'efficacité des cyprinidés est situé entre 20 et 30 %. Les chiffres du Maka montrent que les salmonidés ont un meilleur taux de franchissement que les cyprinidés avec 78% de franchissement corrigé dont 87% pour la truite et 55% pour l'ombre. L'étude de synthèse de Noonan et al. (2012), donne une efficacité de passage (=taux de franchissement) de 61,7% pour les Salmonidés. Le succès de ces poissons est probablement lié à leur capacité de nage importante (Webb, 1975 ; Baudouin et al., 2014) ainsi qu'à la structure interne de l'échelle (Larinier, 2001; Schilt, 2007). Néanmoins, il faut noter que l'échelle du Maka est censée être multi-espèces avec la présence d'un fond en enrochement et la présence d'orifices de fond. Malgré son caractère multi-spécifique, l'échelle à poissons du site du Maka se révèle plus adaptée pour les salmonidés que les cyprinidés.

L'efficacité étant étroitement liée aux caractéristiques des écoulements, des hauteurs de chutes et de puissance dissipée volumique, croisés avec les performances de nage des poissons. Des mesures de vitesse in situ ont été réalisées afin d'avancer des hypothèses quant au taux de franchissement insuffisants de certaines espèces. Les valeurs relevées montrent qu'il existe un gradient de vitesse de l'échancrure la plus en aval vers l'échancrure la plus en amont : vitesses moyennes au sein de la colonne d'eau de chaque échancrure de l'aval vers l'amont est de 0,99m/s à 1,94m/s (vitesse maximum : de 1,28m/s à 2,01m/s). Au contraire les premières mesures effectuées lors du projet Walphy sont nettement inférieures à celles que nous avons mesurées : le gradient de vitesse de l'aval vers l'amont est de 0,25m/s à 1,55ms lorsque le piège de capture n'était pas colmaté. Ainsi les données obtenues et comparées avec celles de référence dans le guide ICE (Baudouin et al., 2014), nous indiquent que les vitesses dans les échancrures essentiellement amont, correspondent à des vitesses qui s'approchent des limites de capacité de nage des poissons, mais sans toutefois les dépasser. En effet, chez les cyprinidés : $V_{\text{sprint minimum}} = 2,5\text{m/s}$ pour les barbeaux et 2m/s pour les vandoises. Les conditions de vitesses d'écoulement sont donc de plus en plus difficiles lors de la remontée

des poissons dans l'échelle. Cela supporte le fait que la majorité des individus qui n'ont pas franchi l'échelle à poissons ne s'est pas présentée dans la partie amont de l'échelle. Ce constat implique que des espèces avec des capacités de nages inférieures à celles étudiées, plus particulièrement le chabot et les anguilles, pourraient avoir également des difficultés à franchir le barrage via l'échelle à poissons. En revanche, d'un point de vue du type de jets, les conditions de franchissement semblent « optimales » pour les espèces non sauteuses selon le guide ICE (Baudoin et al., 2014) mais il reste difficile de réaliser des mesures *in situ*.

b. Temps de franchissement

Nous avons constaté que les salmonidés franchissaient plus rapidement l'échelle que les cyprinidés. Néanmoins, le faible nombre d'individus de la famille des cyprinidés avec un franchissement total (N= 1), rend les comparaisons statistiques impossibles. Toutefois, plusieurs tendances ont été observées :

- Pour le passage de l'antenne 1 à l'antenne 2 (partie aval de l'échelle), toutes les espèces étudiées sauf le hotu ont réalisé ce demi parcours de l'échelle avec un temps médian de 12min (min= 3min ; max= 3h) pour les truites, 12min (min= 2min ; max= 33min) pour les ombres, 3h30 (min= 32min ; max= 14h) pour le barbeaux et 17min (min= 3 ; max= 1h40) pour les vandoises.
- La seconde partie de l'échelle (antenne 2 à antenne 3), présente des temps de transit similaires pour les salmonidés (temps médian de 27min et de 41min pour respectivement la truite commune et l'ombre commun) mais un temps largement augmenté pour les barbeaux (= 11h07).
- Le temps moyen de sortie des poissons est bon pour la majorité des individus avec un temps médian de 2min pour la truite et 6s pour l'ombre. Cependant certains individus prennent plus de temps avec des maximums de 5h pour la truite et de 1h pour l'ombre. Ces temps peuvent correspondre à la difficulté de franchir cette dernière échancrure (vitesse de courant plus importante) pour ces individus.

Il apparait clairement que la seconde partie de l'échelle à poissons est plus longue à franchir pour les toutes les espèces étudiées avec un résultat plus contrasté pour les ombres et le barbeau, même si pour ce dernier nous n'avons l'information que pour un seul individu. Ce constat justifie une nouvelle fois la difficulté rencontrée dans la partie amont de l'échelle. L'échelle à poissons (25m de long pour un dH de 1,9m) permet en moyenne de franchir le barrage du Maka en 1h (vitesse = 25m/h ou un dH de 1,9m/h) pour la truite, en 2h (=12,5m/h ou un dH de 0,95m/h) pour l'ombre et en 26h (1m/h ou un dH de 0,07m/h). Dans l'étude de

l'échelle à Chancy-Pougny (250m de long et un dH de 12m), le temps de franchissement médian pour les barbeaux est de 2h30 (vitesse = 100m/h ou un dH de 4,8m/h) et dans la passe de Verbois (300m de long et un dH de 20m) il est de 5h (=60m/h ou un dH de 4m/h) (Grimardias et al., 2015). Dans la passe du barrage de Monsin (146m de long pour un dH de 5,5m), les barbeaux effectuent le franchissement entre 2h et 4h (vitesse = 36,5 à 73m/h ou un dH de 1,3m/h à 2,75m/h), le hotu met plus de 3h (vitesse < 49m/h ou un dH de 1,8m/h) et les chevaines affichent un temps médian de 2h45 (vitesse = 53m/h ou un dH de 2m/h) (Ovidio et al., 2016c). Enfin, dans l'échelle à poissons de Gambsheim sur le Rhin en France, le temps de franchissement médian est d'environ 5h (37m/h ou un dH de 2,28m/h) toutes espèces confondues pour une longueur d'échelle de 187m et un dH de 11,4m (Tétard et al., 2014 : Rapport EDF). Les échelles à poissons de ces études étant plus longues (25m pour celle du barrage du Maka), l'analyse des vitesses de franchissement en mètre par heure (m/h) et en variation de hauteur par heure (dH en m/h) permettent une comparaison plus objective. Il apparaît que dans le Bocq, les vitesses sont inférieures par rapport aux études précitées.

4.5. Analyse des comportements fins

4.5.1. Comportements d'approche à l'entrée de l'échelle à poissons

Grâce au système RFID, nous avons observé que les Salmonidés qui ont franchi le barrage, effectuaient préférentiellement N=1 approche (50% des truites et 20% des ombres) ou deux approches de la passe (45% des truites et 60% des ombres). Ceux qui n'ont pas franchi effectuaient également majoritairement N=1 approche (67% des truites et 75% des ombres). La tendance est inversée chez les Cyprinidés qui se présentent le plus souvent, de minimum N=3 fois à l'entrée de la passe (85% des barbeaux et 50% des vandoises). Cette tendance est retrouvée dans l'expérience de la passe à poissons de Gambsheim sur le Rhin pour des Cyprinidés (barbeau, chevaine, hotu, brème et aspe) avec un nombre moyen de 2,7 tentatives d'approches (Tétard et al., 2014). Ce nombre d'approches n'apparaît donc pas décisif dans la décision de franchir ou non l'échelle à poissons pour une même espèce mais il permet d'observer une certaine réticence ou hésitation à utiliser l'échelle à poissons qui dans notre cas est plus marquée une nouvelle fois pour les cyprinidés.

4.5.2. Influence du débit du Bocq sur les comportements

Le débit de fonctionnement de l'échelle à poissons du barrage du Maka est de 300l/s. Selon son dimensionnement initial, ce débit est constant en fonction du débit du Bocq jusqu'à 5m³/s (2 fois le module). Au-delà de ce débit seuil, le débit de fonctionnement peut être supérieur.

L'analyse de comportements de franchissement en fonction du débit montre que le débit maximum lors d'un franchissement était de $4,3\text{m}^3/\text{s}$ pour une truite. Cependant le débit du Bocq n'était pas supérieur à $5\text{m}^3/\text{s}$ lors des différentes périodes de migration de reproduction mis à part pour la vandoise avec comme conséquence le colmatage de l'échelle à poissons qui rendait le franchissement impossible. Ce constat est le même pour une truite qui a réalisé un franchissement partiel début juin lors de cette phase de crue (débit Bocq $> 9\text{m}^3/\text{s}$). Les comportements d'hésitation au sein de l'échelle à poissons que sont les comportements d'approches, de franchissement partiel et d'aller-retour ne sont pas plus abondant proportionnellement lors d'augmentation du débit du Bocq. De plus, les temps de franchissement de l'échelle à poissons ne dépendent pas du débit de la rivière en tenant compte qu'aucun franchissement ne s'est déroulé lorsque le débit du Bocq était supérieur à $5\text{m}^3/\text{s}$.

4.5.3. Comportements post-franchissements

Le comportement adopté par les différents individus après avoir franchi entièrement la passe migratoire, a été analysé et on observe plusieurs tendances :

- Majoritairement les poissons de la famille des salmonidés sont restés en amont (64%). Les truites transloquées en automne et les ombres transloqués au début du printemps sont probablement remontées à la recherche de frayères pour la reproduction (Ovidio, 1998 et 1999) tandis que les individus transloqués en dehors de leur période de reproduction, se sont déplacés probablement à la recherche d'habitats favorables, notamment pour trouver des ressources alimentaires et des zones de repos. Ces individus peuvent également chercher des zones de refuges pour éviter les prédateurs (Lucas et Baras, 2001).
- Une partie des truites et des ombres a dévalé par la suite, que ce soit via l'échelle à poissons (20%) ou que ce soit via le barrage (16%). Il est d'autant plus curieux pour ces individus que ces derniers ont été initialement capturés en amont du barrage. Ensuite certains individus ont réitéré un ou plusieurs (succession de franchissements et de dévalaison) franchissements de l'échelle avant de rester définitivement en amont.
- Le seul barbeau qui a franchi l'échelle a effectué une dévalaison via celle-ci par la suite. Notons que le Bocq n'est pas une rivière cyprinicole et que son attractivité pour le barbeau est probablement très limitée, notamment au vu des conditions thermiques.

5. Conclusions et perspectives

Après un monitoring continu (d'octobre à juin) des comportements de poissons marqués et relâchés dans le Bocq (en aval du barrage du Maka), nous pouvons dresser le bilan suivant :

- La méthode de translocation de poissons de zones amont vers l'aval de la passe a fonctionné essentiellement lorsqu'elle a été réalisée proche ou lors de la période de migration de reproduction. L'utilisation de poissons issus de pisciculture est moins recommandée pour ce genre d'étude au vu des très faible taux de détection.
- L'utilisation de la biotélémetrie et de l'analyse fine des comportements individuels s'est avérée efficace pour mettre en évidence les bons points et les dysfonctionnements de l'échelle à poissons.
- Dans les conditions d'étude, **en l'absence de fonctionnement de la turbine en vis Archimède**, l'attractivité de l'échelle mesurée par double marquage est considéré trop faible, 33% au total : 8 sur 24 individus doublement marqués (40% des truites, 40% des ombres, et 0% des barbeaux).
- Le temps de recherche de l'entrée est acceptable pour la truite (temps médian de 12h) mais beaucoup trop long pour l'ombre (temps médian de 465h pour les ombres) en période de migration pour la reproduction.
- Le taux de franchissement corrigé de la passe migratoire est nettement meilleur pour les salmonidés (87% pour la truite, 55% pour l'ombre) comparé à celui des cyprinidés (7% pour le barbeau).
- Les vitesses de courant mesurées de l'aval vers l'amont au droit de chaque échancrure, mettent en évidence un gradient croissant. Celui-ci pose probablement des problèmes de transit dans l'échelle aux espèces avec de faibles capacités de nage et de saut. C'est probablement ce qui explique l'efficacité moindre pour les cyprinidés par rapport aux salmonidés.

Au terme de cette étude, il apparaît que l'échelle à poissons du Maka sur la Bocq se montre suffisamment efficace pour les truites et raisonnablement efficace pour les ombres qui sont deux espèces parmi les plus représentatives de la population piscicole du Bocq. Néanmoins, l'attractivité de l'échelle s'est montrée trop faible pour l'ensemble des espèces étudiées. Les cyprinidés rhéophiles qui ont des capacités de nage et de sauts inférieures, ont montré d'énormes difficultés à franchir le dispositif. Le Bocq n'étant pas une rivière cyprinicole mis à part quelques individus recensés lors de pêches électrique (barbeau et chevaine : C. Keulen, communication personnelle), il est intéressant de se demander si leur remontée de la Meuse

vers le cours principal du Bocq est désirée et/ou souhaitable et si leur faible abondance dans la rivière est liée à l'infranchissabilité historique du barrage ou à des conditions environnementales inadaptées dans la rivière. Notons que les barbeaux ont essentiellement été détectés au sein de l'échelle à poissons en dehors de leur période de reproduction, et on ne peut pas exclure que leur stimulation à franchir le barrage soit moindre qu'en période de migration liée à la recherche d'un site de reproduction (printemps). Quoiqu'il en soit, la difficulté de remontée des cyprinidés est une donnée intéressante qui indique que des espèces comme le chabot et l'anguille européenne qui ont des capacités de nages encore inférieures, et qui elles sont bien représentatives du Bocq, pourraient avoir encore plus de difficultés à utiliser la passe migratoire dans son état actuel.

Perspectives d'études

- Un gradient de vitesse croissant de l'amont vers l'aval au sein des échancrures de l'échelle à poissons du barrage du Maka a été observé parallèlement à la difficulté de franchissement de certaines espèces avec des capacités de nage inférieures aux truites. Il serait intéressant de réaliser une analyse hydraulique complète de la passe à différents débits du Bocq.
- Prévoir une nouvelle étude avec la vis d'Archimède en fonctionnement pour vérifier son impact (positif ou négatif) sur l'attractivité générale du dispositif en veillant d'intégrer l'anguille comme espèce cible.
- Combiner la biotélémetrie avec un système de recensement (piégeage – comptage – vidange d'échelle,...) efficace pour évaluer la diversité de la faune piscicole qui emprunte la passe.
- Vérifier l'impact de certaines variables environnementales, plus particulièrement la conductivité (présence d'une carrière en amont) sur les comportements de montaison et de franchissement des poissons en approche du barrage du Maka.

Perspectives d'aménagements

- Dans le cas où le fonctionnement de la vis d'Archimède n'améliorerait pas l'attractivité de l'échelle à poissons, il sera nécessaire d'envisager des travaux en aval et/ou à l'entrée de l'échelle pour augmenter son attractivité (angle de sortie, dispositif de guidage, ...). Il

conviendra de vérifier l'impact de ces modifications sur le taux d'attractivité et de franchissement des espèces cibles.

- Améliorer le design hydraulique de l'échelle à poissons (vitesse de courant, puissance dissipée, type de jet, ...) si d'autres espèces que les salmonidés devaient être prises en considération dans le contexte biologique local.

6. Remerciements

Nous tenons à remercier le service de la SPW-DGARNE-DCENN, et plus particulièrement O. Detrait et P. Orban pour le financement du projet. Un grand merci à Victor Paquay, agent DNF, pour sa collaboration très efficace et pour le choix des secteurs de pêche. Nous exprimons nos remerciements à Guy Renard, Président de la Fédération de la Haute Meuse pour son autorisation de capture de poissons et pour sa présence sur le terrain. Merci aux personnes qui nous ont aidé lors des différentes pêches électriques (DCENN, Fédération Meuse Amont, étudiants Ulg).

7. Références bibliographiques

- Armstrong, J.D., Braithwaite, V.A., & Rycroft, P., (1996). A flat-bed passive integrated transponder antenna array for monitoring behaviour of Atlantic salmon parr and other fish. *Journal of fish Biology*, 48, 539-541.
- Baras, E., Lambert, H., & Philippart, J. (1994). A comprehensive assessment of the failure of *Barbus barbus* spawning migrations through a fish pass in the canalized river Meuse (Belgium). *Aquatic Living Resources*, 7, 181–189.
- Baras, E. (1995). Seasonal activities of *Barbus barbus*: effect of temperature on time-budgeting. *Journal of Fish Biology*, 46, 806–818.
- Bardonnnet, A., & Gaudin, P. (1991). Influence of daily variations of light and temperature on the emergence rhythm of grayling fry (*Thymallus thymallus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48, 1176–1180.
- Baudoin, J., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., & Sremski, W., Steinbach, P. et Voegtle, B., (2014). Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons. Principes et méthodes. Onema. 200 pages.
- Benitez, J. P., Nzau Matondo, B., Dierckx, A., & Ovidio, M. (2015). An overview of potamodromous fish upstream movements in medium-sized rivers, by means of fish passes monitoring, *Aquatic ecology*, 49(4), 481–497.
- Britton, J. R., & Pegg, J. (2011). Ecology of European barbel *Barbus barbus*: implications for river, fishery, and conservation management. *Reviews in Fisheries Science*, 19, 321–330.
- Bunt, C. M., Castro-Santo, T., & Haro, A. (2012). Performance of fish passage structures at

- upstream barriers to migration. *River Research And Applications*, 28, 457–478.
- Calles, E. O., & Greenberg, L. A. (2005). Evaluation of nature-like fishways for re-establishing connectivity in fragmented salmonid populations in the river Emån. *River Research And Applications*, 21, 951–960.
- Castro-Santos, T., Haro, A. & Walk, S., (1996). A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. *Fisheries Research*, 28, 253-261.
- Castro-santos, T., & Haro, A. (2010). Fish guidance and passage at barriers. Fish locomotion: an eco-ethological perspective. *Science Publishers*.
- Collins, C. B., & Elling, C. H. (1960). Fishway research at the fisheries-engineering research laboratory. *U S Fish and Wildlife Service Circular*, 98, 1 - 17.
- Elliot, J. M. (1994). Quantitative ecology and the brown trout. Oxford University Press, Oxford. *Food & Agriculture Organization of the United Nations*.
- Gennotte V., Prignon C., Dierckx A., Benitez J.P., Ovidio M., Michaux J., Flamand M.C. & Mélard C., (2015). Étude de la diversité génétique et de l'état des stocks des populations de barbeaux et de hotus en Wallonie. Amélioration des techniques d'élevage en vue de repeuplements raisonnés et de transferts de connaissances vers les pisciculteurs. Convention FEP/SPW (n° 32-1109-005). *Rapport final*. Université de Liège, 203 pages.
- Greenberg, L.A. & Giller, P.S. (2000). The potential of flat-bed passive integrated transponder antennae for studying habitat use by stream fishes. *Ecology of Freshwater fish*, 9, 74-80.
- Grimardias, D. et al. (2015). Evaluation de l'efficacité des dispositifs de franchissement des barrages via la méthode telemétrique (module 2). Programme INTERREG IV A France - Suisse. *Communication orale au Colloque de Restitution*, Bonneville (France).
- Heggenes, J., Omholt, P. K., Kristiansen, J. R., Sagrie, J., Økland, F., & Beere, M. C. (2007). Movements by wild brown trout in a boreal river: response to habitat and flow contrasts. *Fisheries Management and Ecology*, 14, 333–342.
- Huber, M. & Kirchhofer, A. (1998). Radio telemetry as a tool to study habitat use of nase (*Chondrostoma nasus* L.) in medium-sized rivers. *Hydrobiologia*, 371/372, 309-319.
- Huet, M. (1949). Aperçu des relations entre la pente et les populations piscicoles des eaux courantes. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 11(3-4), 332-351. doi: 10.1007/BF02503356.
- Larinier, M. (2001). Dams, Fish and Fisheries: Opportunities, Challenges and Conflict Resolution. *FAO Fisheries Technical Paper*, 419, 45–90.
- Lucas, M.C. & Baras, E. (2001). Migration of freshwater fishes. Balckwell Science, Oxford.
- Ovidio, M., Baras, E., Goffaux, D., Birtles, C., & Philippart, J.-C. (1998). Environmental unpredictability rules the autumn migration of brown trout (*Salmo trutta* L.) in the Belgian Ardennes. *Hydrobiologia*, 371-372, 263-274.
- Ovidio, M. (1999). Cycle annuel d'activité de la truite commune (*Salmo trutta* L.) adulte : Étude par radio-pistage dans un cours d'eau de l'Ardenne belge. *Bulletin Français de La Pêche et de La Pisciculture*, (352), 1–18.
- Ovidio, M., Parkinson, D., Philippart, J., & Baras, E. (2007). Multiyear homing and fidelity to residence areas by individual barbel (*Barbus barbus*). *Belgian Journal of zoology*, 137(July), 183–190.
- Ovidio, M., & Philippart, J. (2008). Les phénomènes de mobilité chez les poissons de nos cours d'eau, *Le pêcheur belge* pp. 20–23.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Ballieu, T., Sonny, D., Marechal, M., & Watthez, Q. (2015). Monitoring des poissons par RFID au niveau du canal de fuite de la centrale de Coe derivation

- (electrabel). *Rapport final*. 28 pages.
- Ovidio, M., Hanzen, C., Gennotte, V., Michaux, J., Benitez, J., & Dierckx, A. (2016a). Is adult translocation a credible way to accelerate the recolonization process of *Chondrostoma nasus* in a rehabilitated river ? *Cybium*, 40(1), 43–49.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Bunel, S., Grandry, L., Spronck, C., & Benitez, J. P. (2016b). Poor Performance of a Retrofitted Downstream Bypass Revealed by the Analysis of Approaching Behaviour in Combination with a Trapping System. *River Research and Applications*. doi: 10.1002/rra.3062.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Matondo, B.N., Benitez, J.P., Philippart, J.C., Bernard, B., Mandiki, R., Evrard, A. Kestemont, P. (2016c). Rapport final annuel 2016 au Service Public de Wallonie (DGARNE/DNF-SP) de la Subvention 2015-2016 relative au suivi scientifique de la réhabilitation du saumon atlantique dans le bassin de la Meuse. Université de Liège et Université de Namur, 175 pages.
- Noonan, M. J., Grant, J. W. A., & Jackson, C. D. (2012). A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, 13, 450–464.
- Prentice, E.F., Flagg, T.A., McCutcheon, C.S. & Brastow, D.F., (1990). PIT tag monitoring systems for hydroelectric dams and fish hatcheries. *American Fisheries Society Symposium*, 7, 317-322.
- Reisenbichler, R. R., & McIntyre, J. D. (1977). Genetic differences in growth and survival of juvenile hatchery and wild steelhead trout, *Salmo gairdneri*. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 34, 123–128.
- Schilt, C. R. (2007). Developing fish passage and protection at hydropower dams. *Applied Animal Behaviour Science*, 104, 295–325.
- Tétard, S., De Oliveira, E., Schaeffer, F., & Clair, B. (2014). Etude du comportement des cyprinidés dans la passe à poissons de Gambsheim (Rhin , France) entre 2011 et 2013 - Utilisation de la technique RFID. *Rapport final EDF*, 65 pages.
- Verniers, G., et Peeters, A., (2013). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la restauration hydromorphologique des masses d'eau en Région Wallonne. Rapport scientifique WALPHY LIFE-Environnement (LIFE07 ENV :B/000038). 258 pages.
- Webb, P. W. (1975). Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada 190, 1–158. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 190, 1–158.