



HAL
open science

Étude d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour les smolts de saumon atlantique

Aurélien Frey, Sylvie Tomanova, Olivier Mercier, Sylvain Richard, Dominique Courret, Stéphane Tétard, Laurence Tissot, Vincent Mataix, Thierry Lagarrigue

► To cite this version:

Aurélien Frey, Sylvie Tomanova, Olivier Mercier, Sylvain Richard, Dominique Courret, et al.. Étude d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour les smolts de saumon atlantique : Projet EFFIGRI - Synthèse des résultats 2017-2018. ECOGEA; OFB; EDF R&D; EDF CIH. 2020. hal-04193702

HAL Id: hal-04193702

<https://ofb.hal.science/hal-04193702>

Submitted on 1 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Etude d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour les smolts de saumon atlantique

- Projet EFFIGRI -

Prise d'eau de Las Rives



Prise d'eau de Las Mijeannes



Prise d'eau de Guilhot



Prise d'eau de Pébernat



Synthèse des résultats 2017-2018

**Aurélien FREY, Sylvie TOMANOVA, Olivier MERCIER, Sylvain RICHARD, Dominique
COURRET, Stéphane TETARD, Laurence TISSOT, Vincent MATAIX, Thierry LAGARRIGUE**

Décembre 2020

Avec la collaboration de :

E.D.F. – Unité de Production Sud-Ouest

ONDULIA – Groupe CANTOS

- **AUTEURS :**

Aurélien FREY

(ECOGEA, Muret), aurelien.frey@ecogea.fr

Sylvie TOMANOVA*

(OFB - Pôle Ecohydraulique OFB-IMFT-PPRIME, Toulouse), sylvie.tomanova@ofb.gouv.fr

Olivier MERCIER

(OFB - Pôle Ecohydraulique OFB-IMFT-PPRIME, Toulouse), olivier.mercier@ofb.gouv.fr

Sylvain RICHARD

(OFB - Pôle Ecohydraulique OFB-IMFT-PPRIME, Toulouse), sylvain.richard@ofb.gouv.fr

Dominique COURRET*

(OFB - Pôle Ecohydraulique OFB-IMFT-PPRIME, Toulouse), dominique.courret@ofb.gouv.fr

Stéphane TETARD

(EDF R&D – LNHE, Chatou), stephane.tetard@edf.fr

Laurence TISSOT*

(EDF R&D – LNHE, Chatou), laurence.tissot@edf.fr

Vincent MATAIX

(EDF CIH, Toulouse), vincent.mataix@edf.fr

Thierry LAGARRIGUE

(ECOGEA, Muret), thierry.lagarrigue@ecogea.fr

*CORRESPONDANTS

Avec la contribution de :

Manon Dewitte (PPRIME), Alexis RENE (OFB), Alain ALRIC (OFB).

- **REMERCIEMENTS :**

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des partenaires dont la participation a permis le bon déroulement de l'étude :

ONDULIA du groupe CANTOS, Mr Joseph Larose (responsable d'exploitation) et Mme Nathalie Lafferrerie (responsable QSE) pour la mise à disposition des sites des centrales de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot ainsi que les locaux de la centrale de Crampagna pour la stabulation et le marquage des poissons.

EDF UP Sud-Ouest et le GEH Aude/Ariège, Mrs Yann CHAFAI et Jean-Bernard LABAT pour nous avoir permis la réalisation de l'étude sur le site de Pébernat, Samir BENZAHRA et Damien BLAZY pour la transmission de données d'exploitation et de plans de l'ouvrage de Pébernat, ainsi que l'ensemble des techniciens pour leur disponibilité sur le site.

MI.GA.DO pour l'approvisionnement et le transport des poissons.

Le **Camping de Las Mijeannes** pour l'accès au site et la mise à disposition d'un local pour une antenne de détection.

Le projet a reçu un avis favorable de la part d'un **Comité d'éthique en expérimentation animale** et a été autorisé par le **Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation**.

Contenu

Synthèse opérationnelle	3
1. Contexte et objectif	5
2. Sites d'étude	7
2.1 Rivière Ariège entre Foix et Pamiers	7
2.2 Las Rives	8
2.3 Las Mijeannes	9
2.4 Guilhot	10
2.5 Pébernat	11
2.6 Synthèse des principales caractéristiques des 4 prises d'eau étudiées	14
3. Matériel et méthodes	15
3.1 Période d'étude	15
3.2 Suivi des déplacements de poissons à l'aide de la radiotéléométrie	15
3.2.1 Matériel de radiotéléométrie utilisé	15
3.2.1 Provenance des poissons, marquage et lâcher	16
3.2.1 Equipement des sites pour le suivi des déplacements des poissons	18
3.2.2 Suivi complété par le tracking mobile	21
3.2.3 Analyses des données de passage	21
3.3 Suivis du débit de l'Ariège et du fonctionnement des aménagements	23
3.3.1 Débit de l'Ariège à Foix	23
3.3.2 Fonctionnement des aménagements hydroélectriques	23
3.4 Analyses de l'influence des paramètres hydrauliques sur l'efficacité des grilles inclinées	24
3.4.1 Métriques décrivant l'efficacité	24
3.4.2 Sélection des variables explicatives	24
3.4.3 Procédure d'analyse	25
4. Résultats	26
4.1 Conditions environnementales au cours de la période d'étude	26
4.1.1 Débits et fonctionnement des usines contrastés en 2017 et 2018	26
4.2 Progression des poissons sur le tronçon d'étude au cours de la première semaine de suivi et entraînement dans les prises d'eau	26
4.3 Nombre d'individus détectés sur chacun des sites	28
4.4 Efficacité des prises d'eau et franchissement global des aménagements ..	28
4.4.1 Las Rives	28
4.4.2 Las Mijeannes	29
4.4.3 Guilhot	30
4.4.4 Pébernat	30

4.5	Temps de passage des poissons selon les voies	32
4.5.1	Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot.....	32
4.5.2	Pébernat	33
4.6	Taille des poissons selon leur voie de passage	34
4.7	Influence des paramètres hydrauliques et de la taille des poissons sur l'efficacité des prises d'eau équipées de grilles inclinées.....	35
4.7.1	Probabilité de passage par les exutoires de dévalaison.....	35
4.7.2	Probabilité de passage par les exutoires sans hésitation.....	35
4.7.3	Zoom sur la perte de charge à Las Rives et Las Mijeannes	36
4.8	Comparaison d'efficacité avec les anciens dispositifs de dévalaison.....	38
5.	Discussion et Conclusions	39
6.	Bibliographie	46
7.	Annexes	49
7.1	Principe de la radiotélémetrie	49
7.2	Présentation détaillée des sites de suivi.....	50
7.2.1	Las Rives	50
7.2.2	Las Mijeannes.....	50
7.2.3	Guilhot	50
7.2.4	Pébernat	51
7.3	Fonctionnement des usines pendant l'étude.....	51
7.3.1	Las Rives	51
7.3.2	Las Mijeannes.....	52
7.3.3	Guilhot	52
7.3.4	Pébernat	53
7.4	Calculs des paramètres de fonctionnement des aménagements hydroélectriques de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot.....	55
7.5	Heure d'arrivée des poissons dans les prises d'eau au cours de l'étude....	57

SYNTHESE OPERATIONNELLE

L'objectif principal de cette étude était **d'évaluer pour les smolts de saumon atlantique l'efficacité des prises d'eau ichtyocompatibles préconisées en France** – constituées d'un plan de grille à faible espacement libre entre barreaux, incliné ou orienté et associé à un ou plusieurs exutoire(s) de dévalaison – **afin d'en valider ou non les critères de conception**.

L'étude s'est déroulée en 2017 et 2018 sur 4 aménagements hydroélectriques de l'Ariège, situés en série sur le même tronçon : Las Rives, Las Mijeannes, Guilhot (**3 sites équipés de plan de grille incliné**) et Pébernat (équipé d'un **plan de grille orienté**, dans le prolongement d'une berge). Le déplacement de 199 poissons sur ce tronçon a été suivi par **radiotélémetrie**. Les poissons ayant franchi les aménagements étudiés ont une taille moyenne comprise entre 175 et 178 mm selon les années.

Les deux années de suivi ont été contrastées d'un point de vue hydrologique sur la période de dévalaison des smolts. **L'hydrologie plus soutenue de 2018** par rapport à 2017 **a motivé davantage d'individus relâchés à migrer** la première semaine après leur lâcher. Cette année-là, **leur vitesse de migration** a été bien **plus rapide**. Sur les sites de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot, les taux d'entraînement dans les prises d'eau ont varié entre 85 % et 91 % en 2017 et entre 25 % et 81 % en 2018. Les forts taux d'entraînement observés à Pébernat les deux années (96 % et 95 %) sont dus à la présence de la vanne-toit, ouvrage évacuateur prioritaire, au sein de la prise d'eau.

L'évaluation de **l'efficacité des prises d'eau**, basée sur le franchissement de 53 à 114 smolts selon les sites, **varient entre 86 % et 96 %** (entre 70 % et 100 % selon les différents lots testés). En considérant l'ensemble des voies de migration a priori sans dommage pour les poissons, à savoir les exutoires de dévalaison et le barrage, le taux global de franchissement des aménagements par une voie saine a été de 90 % à 98 % selon les sites. En tenant compte des taux de mortalité dans les turbines, globalement pour 2017 et 2018, les taux de survie des smolts franchissant les aménagements étudiés ont été estimés entre 98 % et 99.6 % selon les sites.

Sur les trois sites équipés de plans de **grilles inclinés** (Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot), les **temps de passage** par les exutoires ont été en grande majorité **très rapides**, puisque **entre 78 % et 90 % des poissons passent en moins de 5 minutes** à partir du moment où ils se sont présentés devant la prise d'eau. Les temps de passage mesurés à Pébernat, équipé d'un **plan de grille orienté**, sont un peu plus longs (de part de sa configuration différente), mais demeurent **très satisfaisants** avec **environ 65 % des poissons qui passent en moins de 5 minutes**.

Sur les trois sites équipés de plans de grilles inclinés, **la proportion du débit transitant par les exutoires de dévalaison par rapport au débit du canal d'amenée** a été identifiée comme un **facteur important**. Ce débit ($Q_{exu}\%$) issu des règles de conception préconisées, **égal à 3 %** pour les 3 prises d'eau concernées, **apparaît comme un bon rapport [débit alloué / efficacité]** avec une probabilité de passer par les exutoires de dévalaison d'environ 85 % et une probabilité d'un passage sans hésitation d'environ 80 %. Il convient de **ne pas adopter de valeur de $Q_{exu}\%$ inférieure aux valeurs issues des règles de conception préconisées sous peine de dégrader sensiblement les performances des dispositifs**. Inversement, des **valeurs de $Q_{exu}\%$ supérieures peuvent améliorer encore plus leurs performances**. **L'augmentation de ce débit est donc à considérer sur les sites où cela n'a aucun impact sur la production d'énergie**, e.g. dans les cas de disponibilité de débit dans le cadre de la restitution de tout ou partie d'un débit réservé ou de possibilité d'augmentation du débit avec l'élévation du niveau d'eau amont une fois les usines saturées. **L'augmentation du débit de dévalaison devrait également être envisagée lorsque les autres critères de dimensionnement ne peuvent pas être respectés** à cause des contraintes de réalisation sur les sites.

La conception des exutoires à Las Rives, intégrant les préconisations les plus récentes sur l'obturation du sommet de grille et sur les dimensions et espacement entre exutoires, pourrait

expliquer la probabilité plus importante de passage par les exutoires sans hésitation, observée sur ce site.

En comparaison avec les performances des dispositifs de dévalaison antérieurs, constitués d'un exutoire associé au plan de grille conventionnel, les **gains d'efficacité** pour les smolts de saumon atlantique apportés **par les prises d'eau ichtyocompatibles** représentent en moyenne **48,6 % sur Las Rives, 55,4 % sur Las Mijeannes, 27,4 % sur Guilhot et 24,6 % sur Pébernat.**

Les performances des 4 prises d'eau étudiées apparaissent satisfaisantes, stables entre les sites et entre les différents lots testés et dans différentes conditions hydrologiques. En complément des 4 sites déjà évalués par Tomanova et al. (2018a) et des retours d'expériences acquis à l'étranger, **ces résultats valident les critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles préconisés en France** (Courret & Larinier, 2008; Raynal et al., 2013b; Courret et al., 2015) **et confirment l'intérêt de ces dispositifs** pour rétablir la dévalaison sans dommage des smolts de saumon atlantique au niveau des ouvrages hydroélectriques. Les impacts résiduels sur les smolts ne sont toutefois pas totalement nuls (0.4% à 2% de mortalité globale par site). En conséquence, le cumul des impacts unitaires des aménagements hydroélectriques sur les axes très fortement équipés peut conduire à observer des taux de mortalités cumulés significatifs, et ce malgré la mise en place de prises d'eau ichtyocompatibles respectant les règles de l'art au niveau de chaque site.

1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Depuis plusieurs dizaines d'années, des programmes de restauration et de protection des poissons migrateurs ont été mis en place en France. En ce qui concerne les problématiques de libre circulation des poissons, les efforts se sont en premier lieu concentrés sur la franchissabilité des obstacles à la montaison. Les questions de la vulnérabilité des poissons lors de la dévalaison ont été traitées plus tardivement (Larinier & Travade, 1999a). Il est acquis qu'au niveau des ouvrages hydroélectriques, des mortalités importantes peuvent être observées (Gomes & Larinier, 2008). L'attention s'est donc récemment portée sur la problématique d'entraînement des poissons dans les prises d'eau et les turbines. Cette problématique se pose avec acuité pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) et de truite de mer (*Salmo trutta*), du fait du nombre d'aménagements hydroélectriques pouvant être important sur leur parcours de migration. Cela concerne également d'autres espèces migratrices, comme l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), au stade argenté, du fait de sa taille importante pouvant engendrer des taux de mortalité élevés dans les turbines.

Une des solutions pour limiter l'entraînement des poissons vers les turbines consiste en la mise en place de dispositifs qui offrent une voie de passage saine aux poissons en dévalaison au niveau des ouvrages hydroélectriques, et permettent ainsi de limiter les impacts cumulés à l'échelle des axes de migration. L'objectif de tels systèmes est d'atteindre moins de 1% de mortalité par aménagement pour généralement ne pas dépasser 5-10% de cumul sur l'ensemble du parcours du poisson (Tomanova et al., 2018a). A partir de retours d'expériences acquis en France et à l'étranger sur l'efficacité de diverses configurations d'exutoires de dévalaison (Larinier & Travade, 1999a; Travade & Larinier, 2006), les bases de conception et de dimensionnement pour les nouvelles prises d'eau, dénommées "prises d'eau ichtyocompatibles", ont été définies en 2008 (Courret & Larinier, 2008). Il s'agit des plans de grille, inclinée ou orienté, à faible espacement entre barreaux, associés à des exutoires de dévalaison. Des études hydrauliques sur modèle réduit ont ensuite permis de confirmer ou préciser certains critères concernant l'implantation des plans de grille et la conception des exutoires et de produire des formules d'évaluation des pertes de charge adaptées aux configurations préconisées (Raynal et al., 2012, 2013 ; Courret et al. 2015). Ces critères de conception sont également résumés dans les fiches du référentiel technique PAT-Biodiv¹. Il demeure aujourd'hui nécessaire de tester *in situ* l'efficacité biologique de ces prises d'eau ichtyocompatibles, conformes aux préconisations de Courret et Larinier (2008) pour 1) vérifier si les plus hautes efficacités peuvent être atteintes et 2) valider et/ou le cas échéant améliorer certains critères de conception.

En 2015 et 2016, le Pôle Ecohydraulique AFB-IMFT et le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF R&D ont réalisé les premiers tests d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour les smolts de saumon atlantique au niveau de 4 centrales hydroélectriques (3 avec plan de grille incliné et une avec plan de grille orienté) avec de faibles débits d'équipement (entre 4 et 20 m³.s⁻¹ au moment des tests) (Tomanova et al., 2017, 2018b). Les résultats obtenus par marquage-détection donnent pour ces sites des efficacités minimales des dispositifs comprises entre 82,8% et 92,3%, ce qui est considéré satisfaisant et donne du crédit aux critères de conception proposés pour les petites exploitations.

Suite à ces premiers tests, un nouveau projet (dénommé EFFIGRI), construit en collaboration entre le Pôle Ecohydraulique de l'AFB (devenu OFB) et EDF R&D, a été mis en place pour étudier l'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles sur des centrales plus importantes, c'est-à-dire avec un débit d'équipement compris entre 30 et 50 m³.s⁻¹. Dans un premier temps, les tests se sont

¹ PAT-Biodiv : Plateforme d'Appui Technique Biodiversité.

<https://patbiodiv.ofb.fr/fiche-methodologique/continuite-ecologique/prises-deau-ichtyocompatibles-inclinees-rapport-a-lhorizontale-139>

<https://patbiodiv.ofb.fr/fiche-methodologique/continuite-ecologique/prises-deau-ichtyocompatibles-orientees-rapport-a-laxe-ecoulements-361>

concentrés sur les smolts de saumon atlantique. Afin d'optimiser les suivis d'efficacité tout en limitant le nombre de poissons utilisés, il a été décidé d'investiguer un secteur d'étude comportant plusieurs ouvrages hydroélectriques successifs équipés de prises d'eau ichtyocompatibles. Le choix du secteur d'expérimentation s'est finalement arrêté sur la zone de l'Ariège comprise entre l'aval de Foix (09) et Pamiers (09). Ainsi, quatre ouvrages en série ont fait l'objet de mesures d'efficacité : 3 ouvrages amont équipés de prises d'eau avec des plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale (propriété de la société Ondulia), et 1 ouvrage aval équipé d'une prise d'eau avec un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement (exploité par EDF). Les mesures d'efficacité de ces prises d'eau ont été réalisées par radiotéléométrie. Au total, 199 smolts de saumon atlantique ont été marqués par un émetteur radio et relâchés en amont des sites étudiés. Leurs voies de franchissement des ouvrages ont été suivies par un réseau de récepteurs installés au niveau de chaque site. L'étude s'est déroulée au cours des printemps 2017 et 2018.

L'efficacité des prises d'eau ichtyocompatibles a été évaluée au travers de l'efficacité de passage E_f et du temps de passage par le dispositif de dévalaison T_{EXU} . Comme dans Tomanova et al. (2018b), pour confirmer la bonne conception d'un dispositif de dévalaison, de très hautes efficacités de passage sont attendues, avec une faible variabilité entre les différents sites testés et dans différentes conditions environnementales. De plus, il est attendu que la grande majorité des poissons passe par le dispositif sans hésitation. Sans identifier à partir de quelle valeur le retard de franchissement deviendrait préjudiciable au succès de la migration des smolts, il a été considéré qu'un temps de passage inférieur ou égal à 5 minutes est suffisamment faible pour être sans impact significatif.

La taille des poissons selon leur voie de passage a été analysée au niveau des 4 sites, pour vérifier si le rôle de barrière comportementale de la grille est différent en fonction de leur taille.

Au niveau des 3 sites équipés de prises d'eau avec des plans de grille inclinés par rapport à l'horizontale, les éventuelles influences de la taille des poissons et des paramètres décrivant le fonctionnement hydraulique des prises d'eau sur leur efficacité ont été analysées au travers de régressions logistiques permettant d'isoler les effets de chaque variable.

Enfin, compte-tenu du fait que des résultats de tests d'efficacité des dispositifs de dévalaison antérieurement installés sur ces sites étaient disponibles (Lauters & Segura, 1998; Croze, 2008), il a été possible de comparer les résultats obtenus et de mesurer le gain apporté par les dispositifs de prise d'eau ichtyocompatibles.

Ce rapport présente le bilan des deux années de tests.

2. SITES D'ETUDE

2.1 Rivière Ariège entre Foix et Pamiers

Le suivi de la dévalaison des smolts de saumon atlantique a été réalisé sur un tronçon de la rivière Ariège, dans le département du même nom (09). L'Ariège est un affluent rive droite de la Garonne et son module (débit moyen inter-annuel) à Foix (09) est de $39,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (période 1905-2019, source Banque Hydro). Le régime hydrologique de l'Ariège à Foix est marqué par de hautes eaux printanières (d'avril à juin, Figure 1) liées à la fonte des neiges. Le mois de mai présente un débit moyen correspondant à 2 fois le module. Dès le mois de juillet, le débit diminue rapidement pour atteindre la période d'étiage en fin d'été et début d'automne.

Le tronçon étudié comporte 4 centrales hydroélectriques en série, de l'amont vers l'aval : Las Rives, Las Mijeannes, Guilhot, toutes 3 propriétés du Groupe Ondulia, et Pébernat, ouvrage exploité par EDF (Figure 2). Les 4 aménagements sont consécutifs et sont assez proches, avec une distance d'environ 17 km entre la prise d'eau du site amont (Las Rives) et celle du site aval (Pébernat). Entre les centrales de Guilhot et de Pébernat, on peut noter la présence de la prise d'eau de la digue du Foulon au niveau de la ville de Pamiers, qui permet l'alimentation des canaux de la ville. Cet aménagement est toutefois sans usage hydroélectrique et ne dérive qu'un faible débit ($4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) par rapport au module du cours d'eau. Les modules calculés au niveau des ouvrages sont compris entre $41,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $44,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

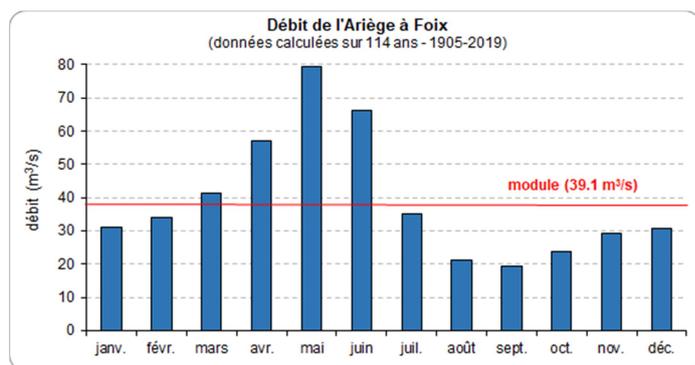


Figure 1 : débit moyen mensuel de l'Ariège à Foix (chronique 1905-2019, source : <http://hydro.eaufrance.fr/>).

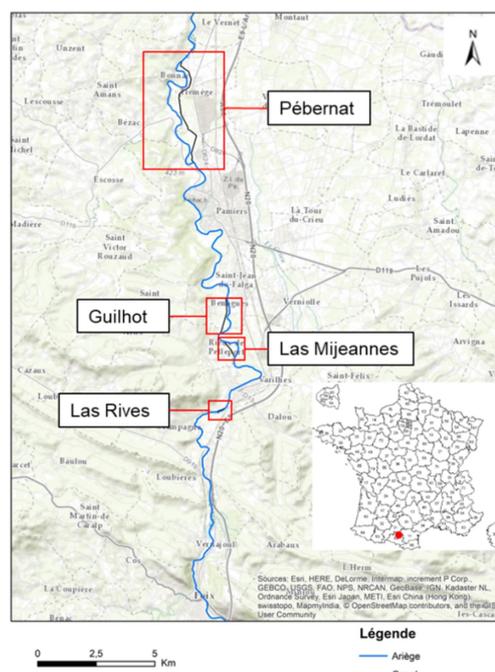


Figure 2 : présentation du secteur d'étude sur l'Ariège entre Foix (09) et Pamiers (09).

Les sites d'études sont décrits succinctement dans les paragraphes ci-dessous. Des détails complémentaires sont indiqués en annexe 7.2.

2.2 Las Rives

La centrale hydroélectrique de Las Rives (LASR) est l'aménagement le plus en amont de l'étude. Elle se situe sur la commune de Varilhes (09) et appartient au groupe Ondulia. L'aménagement est composé d'un seuil d'environ 220 m de haut. L'équipement total de la prise d'eau est de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

La prise d'eau principale est positionnée à l'extrémité amont du canal d'amenée (Figure 3). Elle est équipée d'un plan de grille incliné à 26° par rapport à l'horizontale, avec un espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 1). Le plan de grille guide les poissons en surface vers 3 exutoires de 1 m de largeur et 0,5 m de profondeur. Les exutoires mènent les poissons dans une goulotte collectrice. A l'extrémité de cette goulotte, le débit total transitant par les exutoires est égal à $1.35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la cote normale de la retenue, soit 3 % du débit d'équipement de la prise d'eau (Photo 2). Ce débit est contrôlé par un seuil fixe et donc susceptible de varier à la hausse ou à la baisse lorsque le niveau de la retenue est au-dessus ou en-dessous de sa cote normale. Les poissons sont acheminés via une goulotte de transfert vers le tronçon court-circuité de l'Ariège (Photo 3 et Photo 4).

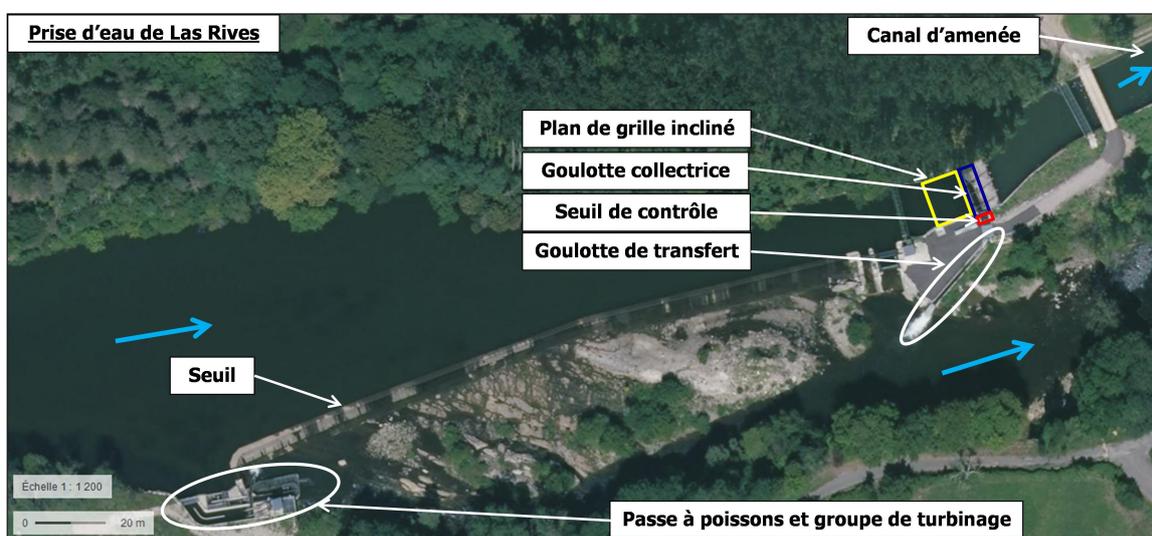


Figure 3 : vue aérienne de la prise d'eau de Las Rives.



Photo 1 : plan de grille fine incliné à 26° et exutoires de Las Rives (hors d'eau).



Photo 2 : seuil de contrôle du débit à l'extrémité aval de la goulotte collectant les exutoires.



Photo 3 : goulotte de transfert de Las Rives.



Photo 4 : chute à l'extrémité aval de la goulotte de transfert jusque dans l'Ariège.

2.3 Las Mijeannes

La centrale hydroélectrique de Las Mijeannes (LASM, Figure 7), propriété du groupe Ondulia, se situe à Rieux de Pelleport (09). L'aménagement est composé d'un seuil d'environ 130 m (Photo 5). L'équipement total de la prise d'eau est de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La prise d'eau est positionnée à l'extrémité amont du canal d'amenée (Figure 4). Elle est équipée d'un plan de grille incliné à 26° par rapport à l'horizontale, avec un espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 6). Le plan de grille guide les poissons en surface vers 3 exutoires de 0,7 m de profondeur et 0,72 m de large. Les exutoires mènent les poissons dans une goulotte collectrice. A l'extrémité de cette goulotte, le débit total transitant par les exutoires est égal à $1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à la cote normale de la retenue, soit 3 % du débit d'équipement de la prise d'eau. Ce débit est contrôlé par un seuil fixe et donc susceptible de varier à la hausse ou à la baisse lorsque le niveau de la retenue est au-dessus ou en-dessous de sa cote normale. Les poissons sont acheminés via une goulotte de transfert et rejoignent le tronçon court-circuité de l'Ariège (Photo 7 et Photo 8).

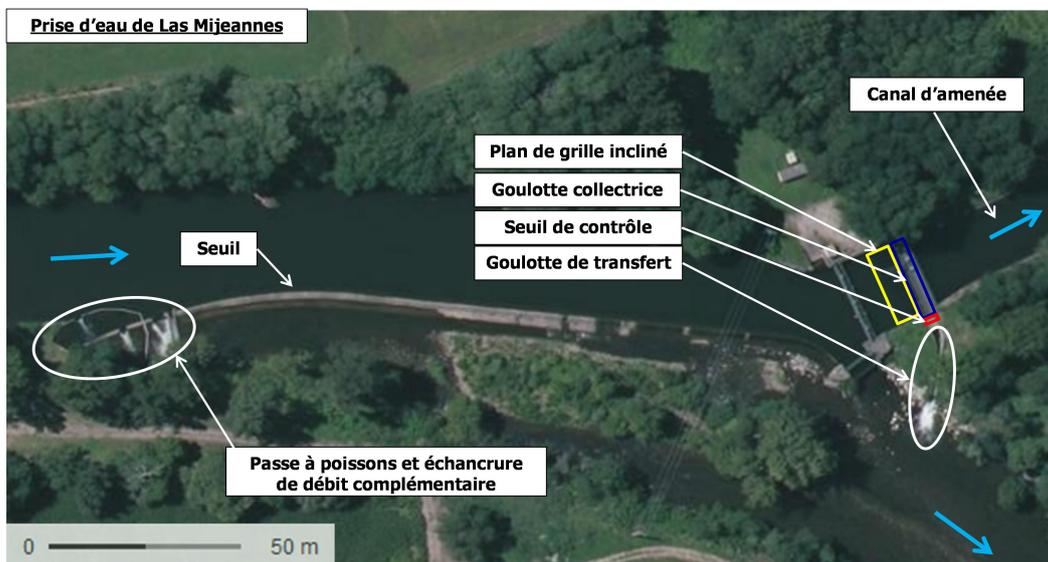


Figure 4 : vue aérienne de la prise d'eau de Las Mijeannes.



Photo 5 : seuil de Las Mijeannes.



Photo 6 : plan de grille et exutoires de Las Mijeannes (hors d'eau).



Photo 7 : goulotte de transfert de Las Mijeannes.



Photo 8 : rejet de la goulotte de transfert dans l'Ariège.

2.4 Guilhot

La centrale hydroélectrique de Guilhot (GUI, Figure 7 ; Photo 9 et Photo 11), propriété du groupe Ondulia, se situe sur la commune de Benagues (09). L'aménagement est composé d'un seuil d'environ 130 m (Photo 10). L'équipement total de la prise d'eau est de $33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La prise d'eau est positionnée à l'extrémité amont du canal d'amenée (Figure 5). Elle est équipée d'un plan de grille incliné à 26° par rapport à l'horizontale, avec un espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 11). Le plan de grille guide les poissons en surface vers 3 exutoires de 0,65 m de profondeur et 0,57 m de large. Les exutoires mènent les poissons dans une goulotte collectrice (Photo 11). A l'extrémité aval de cette goulotte, le débit total transitant par les exutoires est égal à $0,99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit 3 % du débit de la prise d'eau (Photo 12). Ce débit est contrôlé par un seuil fixe et donc susceptible de varier à la hausse ou à la baisse lorsque le niveau de la retenue est au-dessus ou en-dessous de sa cote normale.

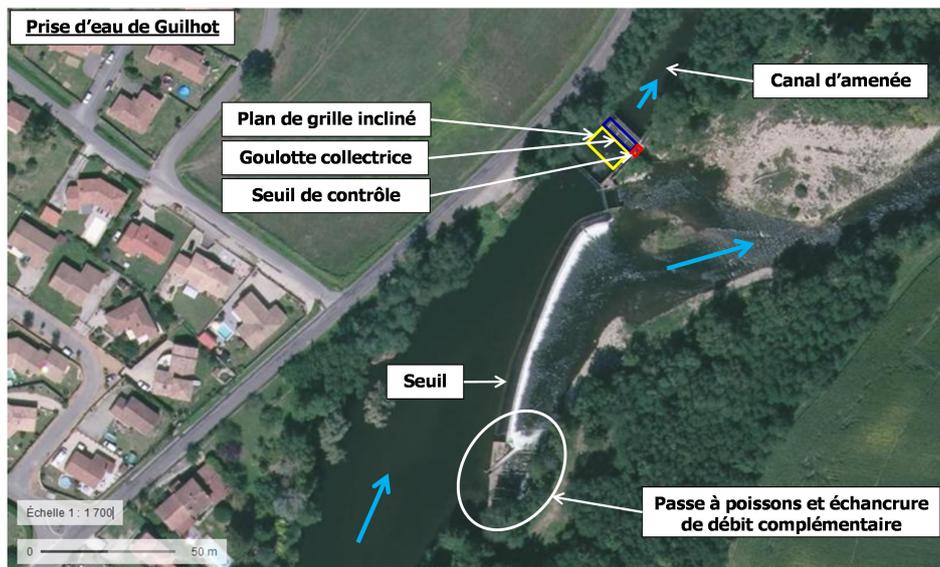


Figure 5 : vue aérienne de la prise d'eau de Guilhot.



Photo 9 : vue générale de la prise d'eau de Guilhot.



Photo 10 : seuil de Guilhot.



Photo 11 : plan de grille, exutoires et goulotte collectrice de Guilhot.



Photo 12 : seuil de contrôle du débit et restitution directe dans le tronçon court-circuité de l'Ariège.

2.5 Pébernat

La centrale hydroélectrique de Pébernat, (PEB, Figure 7) est exploitée par EDF. La prise d'eau de cette centrale est située sur la commune de Pamiers (09) au lieu-dit « La Cavalerie » et est la plus en aval du secteur d'étude. L'aménagement est composé d'un barrage de 85 m composé d'un mur

déversant d'environ 45 m et de 2 clapets de régulation de 15 m chacun (Photo 13, Photo 14). L'équipement total de la centrale est de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La prise d'eau est positionnée à l'extrémité amont du canal d'amenée (Figure 6). Un plan de grille quasi-vertical (inclinaison à 85° par rapport à l'horizontale) est installé dans le prolongement de la berge rive droite et présente une largeur de 60 m et une profondeur de 1.75 m, et ainsi une surface immergée de 105 m^2 (Photo 15). L'espacement libre entre les barreaux est de 20 mm. Ce plan de grille s'apparente à un plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement, avec des vitesses tangentielles guidant les poissons vers le coin aval de la grille.

Au bout du chenal de prise d'eau, au niveau de l'extrémité aval du plan de grille, se trouvent une vanne secteur coté rive droite, de 6 m de large, servant à l'évacuation des corps dérivants et des sédiments, ainsi qu'une vanne-toit coté rive gauche, de 17 m de large, servant à la régulation du niveau de la retenue. Cette vanne-toit est actionnée automatiquement par un système de flotteur.

Un unique exutoire a été aménagé au milieu de la vanne secteur pour être au plus près possible du coin aval du plan de grille (distance de l'ordre de 6 m). Cet exutoire se présente sous la forme d'un clapet déversant de 2 m de large et permet de délivrer un débit de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (soit 4% du débit de la prise d'eau), avec une charge hydraulique de 0.70 m (Photo 16 et Photo 17). La position du clapet est asservie au niveau d'eau de la retenue et le débit de l'exutoire est donc fixe (contrairement aux 3 autres sites).

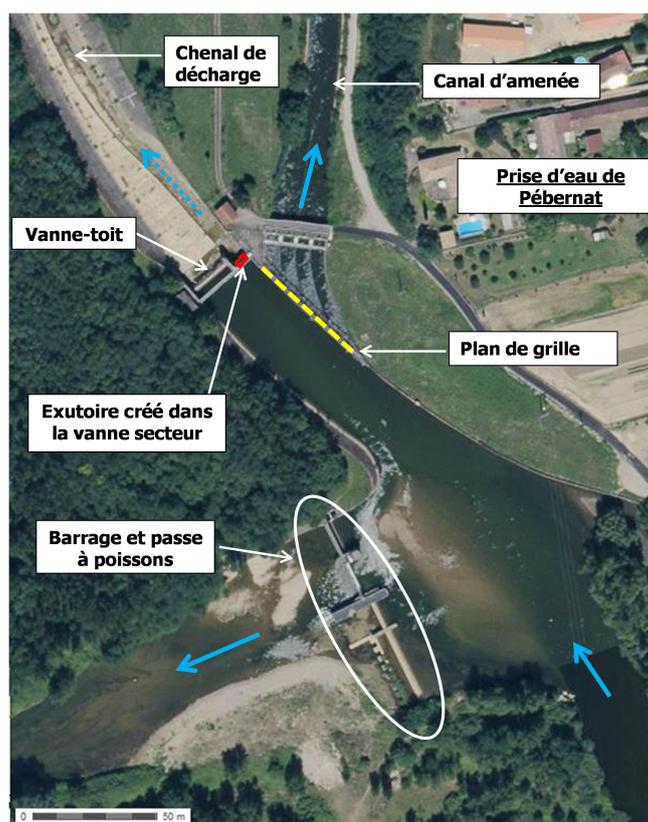


Figure 6 : vue aérienne de la prise d'eau de Pébernat.



Photo 13 : clapets de régulation du barrage.



Photo 14 : vue du débit réservé restitué par le clapet au barrage et la passe à poissons.



Photo 15 : vue aval du plan de grille orienté de la prise d'eau de Pébernat.

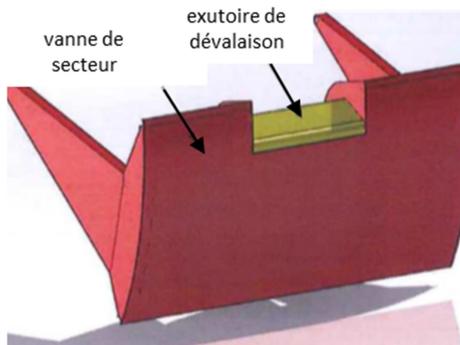


Photo 16 : schéma de la vanne secteur et de l'exutoire de dévalaison.



Photo 17 : exutoire de dévalaison en service ($2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).



Photo 18 : Omniflots® servant de pré-barrage pour créer le bassin de réception.



Photo 19 : vue du bassin de réception en aval de l'exutoire de dévalaison.

2.6 Synthèse des principales caractéristiques des 4 prises d'eau étudiées

Le Tableau 1 récapitule les caractéristiques des 4 prises d'eau étudiées.

Les 3 sites équipés de plans de grille inclinés présentent des caractéristiques assez proches, avec des vitesses d'approche dans les prises d'eau similaires (entre 0.77 m/s et 0.83 m/s), des vitesses normales similaires (entre 0.35 m/s et 0.38 m/s), la même inclinaison du plan de grille (26°) et le même débit alloué aux exutoires en proportion du débit d'équipement (3%). La conception de leurs exutoires est toutefois un peu différente, le dernier site construit, Las Rives, présentant des exutoires moins profonds mais plus larges que les 2 autres sites, ainsi qu'une obturation du sommet de la grille sur la même profondeur que les exutoires, conformément aux recommandations les plus récentes.

Tableau 1 : caractéristiques des prises d'eau étudiées.

		Centrale hydroélectrique			
		Las Rives	Las Mijeannes	Guilhot	Pébernat
Module de l'Ariège	m^3/s	41.8	44.2	44.2	44.8
Débit d'équipement	m^3/s	45	45	33	50*
Largeur de la prise d'eau	m	14.0	21.6	15.0	27.0
Hauteur d'eau	m	4.18	2.58	2.65	2.50
Vitesse d'approche	m/s	0.77	0.81	0.83	0.74*
Type	-	incliné	incliné	incliné	orienté
Inclinaison (angle β)	°	26	26	26	85
Orientation (angle α)	°	90	90	90	"0"***
Obturation du sommet de grille		oui (0.50 m)	non	non	non
Largeur du plan de grille	m	14.0	21.6	15.0	60.0
Longueur de grille immergée	m	8.39	5.89	6.05	1.75
Surface de grille immergée	m^2	117.5	127.1	90.7	105
Vitesse normale pour le débit maximum	m/s	0.38	0.35	0.36	0.48
Espace entre barreaux	mm	20	20	20	20
Nombre d'exutoires		3	3	3	1
Largeur exu.	m	1.0	0.72	0.57	2
Hauteur exu.	m	0.5	0.70	0.65	0.7
Débit alloué à la dévalaison	m^3/s	1.35	1.35	0.99	2
	%	3.0	3.0	3.0	4.0
Type de goulotte (poissons/dégrillats)		mixte	mixte	mixte	séparées

* Sans prendre en compte le débit éventuellement évacué par la vanne-toit

** Plan de grille dans le prolongement de la berge rive droite

3. MATERIEL ET METHODES

3.1 Période d'étude

L'étude s'est déroulée lors des printemps 2017 et 2018. Pour la 1^{ère} année, l'installation des sites et les essais concernant le fonctionnement général du matériel de radiotéléométrie, ainsi que la calibration des antennes, ont été réalisés du 20 février au 09 mars 2017 et le suivi s'est déroulé du 11 avril au 15 mai 2017 (35 jours). Pour la 2^{ème} année, l'installation du matériel a été faite du 06 avril au 18 avril 2018 et le suivi a été mené du 19 avril au 18 mai 2018 (30 jours). Les suivis se sont donc déroulés durant la période de dévalaison naturelle des smolts de saumon atlantique.

3.2 Suivi des déplacements de poissons à l'aide de la radiotéléométrie

Le suivi de déplacement des poissons a été réalisé à l'aide de la radiotéléométrie qui s'est avérée être la technologie de téléométrie la plus adaptée aux objectifs et à la configuration des sites étudiés (voir annexe 7.1 pour le principe de la technologie).

3.2.1 Matériel de radiotéléométrie utilisé

Lors des 2 suivis en 2017 et 2018, la technologie d'émetteur radio codée de la société ATS® (Advanced Telemetry Systems) a été utilisée. Cette technologie permet de suivre de multiples poissons simultanément sur une seule fréquence.

3.2.1.1 Emetteurs

Le choix des émetteurs a été fait pour respecter au maximum les critères suivants :

- La plus petite taille et poids de l'émetteur possible pour causer le moins de gêne au poisson,
- La pulsation maximale pour garantir le décodage des émetteurs dans les zones à forte vitesse de courant, où les poissons restent peu de temps dans la zone de détection des postes récepteurs,
- La durée de vie de fonctionnement des émetteurs suffisante pour garantir l'atteinte des objectifs de l'étude.

Au final, les radio-émetteurs ATS® codé F1720 (Photo 20) ont été retenus pour l'étude. Chaque émetteur mesure 20 mm de long pour 8 mm de diamètre et pèse 2 g. L'antenne de 15 cm est externe. Compte tenu des petites zones surveillées dans lesquelles les poissons peuvent progresser très rapidement (p. ex. via la goulotte de dévalaison), il a été nécessaire d'adopter la pulsation maximale égale à 45 ppm (pulsation par minute) pour garantir leur bonne détection. Du fait de leur petite taille et de la forte fréquence de pulsation, la durée de vie des émetteurs est réduite à une durée de 24 h garantie par le constructeur. En pratique, cette durée s'est avérée de l'ordre de plusieurs jours (ECOGEA, 2017; jusqu'à 9 jours observés au cours de ces études), ce qui semblait suffisant compte tenu du déclenchement rapide de la migration des poissons smoltifiés de la pisciculture après leur lâcher (en général, observé par Tomanova et al., 2018a) et de la longueur modérée du tronçon étudié (17 km).

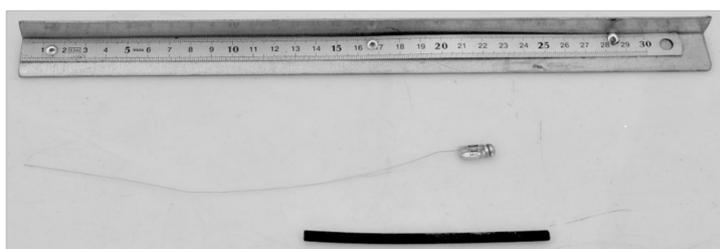


Photo 20 : émetteur F1720 utilisé pour le marquage des smolts avec son tube pousseur.

Des tests de détection ont été effectués sur les sites étudiés au préalable du lancement de l'étude. Ces tests ont mis en évidence de possibles défauts de décodage si plusieurs poissons se présentent en même temps dans certaines zones à passage rapide (goulotte de dévalaison à fort courant). Pour empêcher ces possibles collisions, il a été décidé de fractionner les lâchers de poissons et de limiter le nombre de poissons suivis à chaque lâcher à 25. Par conséquent, chaque saison de suivi, 4 fréquences différentes ont été utilisées (une fréquence par lot de poissons), avec 25 codes différents par fréquence (les moins énergivores).

3.2.1.2 Récepteurs-enregistreurs

Des stations de réception fixes, composées de récepteurs-enregistreurs (modèle ATS R4500C) couplés à une batterie tampon de 12V et à une alimentation 220V/12V de 2A, ont été installées afin de surveiller les différentes voies de franchissement de l'ensemble des ouvrages étudiés (Photo 21). Ces stations reliées à des antennes réceptrices, aériennes (antenne boucle) ou immergées (câble radio coaxial RG 58 avec partie dénudée de 17 cm de longueur), permettent de surveiller en continu des zones de réception calibrées et de suivre ainsi précisément les déplacements des smolts radio-marqués à des endroits stratégiques.

Pour les postes récepteurs-enregistreurs fixes, les données de détection des poissons sont acquises au pas de temps d'1 minute. La précision sur l'évaluation des temps de passage sera donc également de ± 1 minute. Pour chaque détection de poissons, les données enregistrées sont la date et heure/minute de passage, la fréquence et le code de l'émetteur, le nombre de détection durant la minute, ainsi que la force maximale du signal durant la minute.



Photo 21 : exemples d'installations de récepteur-enregistreurs utilisés pour la détection des smolts sur l'Ariège.

3.2.1 Provenance des poissons, marquage et lâcher

Le suivi a été réalisé sur des juvéniles smoltifiés de saumon atlantique issus de la pisciculture de Pont-Crouzet (81) appartenant à l'association MI.GA.DO. Travailler avec des smolts « sauvages » de l'Ariège n'a pas été possible, en raison de faibles effectifs des poissons sauvages et d'un certain nombre de contraintes techniques pour leur capture. Le choix de l'utilisation de smolts de pisciculture a été renforcé par plusieurs études similaires, en France (Chanseau & Larinier, 1999; Croze, 2008; Bosc et al., 2013, 2016) ou à l'étranger (Nyqvist et al., 2016). Ces dernières ont montré que des poissons issus de pisciculture présentaient un comportement comparable à celui des poissons sauvages concernant les voies de franchissement empruntées.

L'objectif fixé pour obtenir des résultats fiables a été d'atteindre au moins 100 franchissements par ouvrage sur l'ensemble des 2 années de suivi. Compte tenu de divers aléas (p.ex. arrêt de migration, prédation, hydrologie défavorable, durée de fonctionnement des émetteurs), au total 200 poissons (100 chaque année) ont été prévus pour l'étude.

Les poissons ont été stabulés à l'usine hydroélectrique de Crampagna, située à un peu plus d'un kilomètre en amont de Las Rives, dans des bacs alimentés en continu par l'eau de l'Ariège (Photo 22). Les poissons ont été marqués 2-3 heures après leur arrivée, et relâchés 4-5 heures après le marquage, temps jugé suffisant pour leur permettre de récupérer des différentes manipulations.



Photo 22 : bacs de stabulation (1,8 m de diamètre) des smolts à l'usine de Crampagna.

Les poissons à marquer ont été choisis selon des critères de bon état général, de taille (ciblée entre 150 et 190 mm) et d'état de smoltification avancé. Avant toute manipulation, les poissons ont été anesthésiés à l'aide d'une solution à base d'huile essentielle de clou de girofle (eugénoïl à 10 %) dans les proportions de 1,5 ml de cette solution pour 10 l d'eau (n.b. ces faibles dosages d'anesthésiant ont été utilisés à cause de la sensibilité accrue des juvéniles de saumon smoltifiés). Les poissons ont été pesés (au g près) et mesurés (longueur totale, au mm près) puis marqués. Le marquage s'est fait par insertion stomacale. L'émetteur a été introduit en étant positionné au bout d'un « tube pousseur » en plastique semi-souple. Ce tube permet de placer l'émetteur dans la bouche du smolt et de le pousser délicatement jusqu'à l'estomac. Le tube est ensuite retiré et l'antenne est délicatement ressortie par un opercule (Photo 23). D'après Peake (1997), ce mode de marquage n'altère pas les capacités de nage des smolts de saumon atlantique.



Photo 23 : différentes étapes du marquage des smolts : introduction de l'émetteur ; mise en place à l'aide du « tube pousseur » ; sortie de l'antenne par l'opercule et le poisson une fois marqué.

99 et 100 smolts ont été marqués respectivement en 2017 et 2018. Leurs tailles se situent entre 159 et 187 mm en 2017 (taille moyenne 174,4 mm) et entre 161 et 190 mm en 2018 (taille

moyenne 175,8 mm) (Tableau 2). Le ratio médian entre les poids du poisson et de l'émetteur a été de 4 % (min 3,3 % ; max 5,6 %).

Chaque année, 4 lots de 24-25 individus ont été lâchés de nuit (entre 21 et 23h) à environ une semaine d'intervalle (Tableau 2). Les lâchers en amont des 4 sites d'étude ont été privilégiés pour optimiser les suivis d'efficacité tout en limitant le nombre de poissons utilisés (les poissons relâchés en amont peuvent servir à l'évaluation de plusieurs sites). L'objectif poursuivi a été d'enregistrer le plus de franchissements possibles à chaque ouvrage tout en essayant d'équilibrer le nombre de poissons détectés sur chaque site sur l'ensemble des deux années d'étude. C'est pourquoi les lieux de certains lâchers ont été modifiés suite aux analyses rapides des données au cours de l'expérimentation (voir Tableau 2).

Tableau 2 : récapitulatif des lots de poissons marqués (nombre d'individus et leurs tailles), les dates et lieux de chaque lâcher.

	Nb poissons	Taille des poissons (mm)			Modalités de lâcher	
		Moyenne	Min	Max	Date	Lieux
2017		174,4	159	187		
lot 1	24	177,5	166	187	11/04/2017	amont Las Rives
lot 2	25	175,4	161	186	18/04/2017	amont Las Rives
lot 3	25	170,0	159	185	25/04/2017	amont Pébernat
lot 4	25	171,9	160	183	03/05/2017	aval Las Rives
2018		175,8	161	190		
lot 5	25	177,1	165	190	19/04/2018	amont Las Rives
lot 6	25	173,7	161	189	25/04/2018	amont Las Rives
lot 7	25	177,4	163	188	02/05/2018	amont Las Rives
lot 8	25	175,1	161	190	07/05/2018	amont Las Rives
Total		175,3	159	190		

3.2.1 Equipement des sites pour le suivi des déplacements des poissons

Sur chaque site, le principe d'installation a été le même : équiper l'ensemble des voies de passage que peuvent emprunter les poissons suivis (exutoires de dévalaison, turbines ou barrage).

L'équipement des 3 prises d'eau amont (**Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot**), de conception très similaire, a été identique (Figure 7) : 5 antennes ont été placées sur chaque site pour enregistrer les déplacements des poissons marqués :

- **E** : une antenne multi-brins à l'**entrée**, située au niveau des vannes de garde de la prise d'eau. Cette antenne a pour but de contrôler le nombre de poissons se présentant en amont de la prise d'eau et qui y pénètrent,
- **A** : une antenne multi-brins située au niveau du seuil de contrôle du débit situé à l'extrémité aval de chaque goulotte collectrice. Cette antenne enregistre les poissons passés par les exutoires du plan de grille et qui **approchent** le seuil de contrôle (possibilité de retour en amont du poisson),
- **P** : une antenne multi-brins située dans la goulotte de transfert vers l'aval, à l'aval du seuil de contrôle (retour en amont du poisson impossible), afin de valider le **passage** des poissons suivis par le dispositif de dévalaison,
- **R** : une antenne boucle aérienne dans le tronçon court-circuité de la rivière. Cette antenne a 2 fonctions : confirmer le passage par les exutoires et la goulotte de dévalaison en aval de la prise

d'eau et enregistrer les poissons passés par le **barrage** lors des épisodes de surverse (ou la passe à poissons et les organes de restitution du débit réservé),

- **C** : une antenne multi-brins dans le **canal d'amenée** de l'usine, en aval du plan de grille. Cette antenne enregistre les poissons franchissant la prise d'eau en traversant les grilles.

La configuration de la prise d'eau de **Pébernat** est différente. Pour cette dernière, 8 antennes ont été nécessaires pour équiper l'ensemble de la prise d'eau :

- **E** : 2 antennes boucles aériennes, situées à **l'entrée**, en amont (rive droite et rive gauche) de la prise d'eau mais en aval du barrage rive gauche. Ces antennes contrôlent le nombre de poissons marqués se présentant devant la prise d'eau,

- **A** : une antenne multi-brins en amont immédiat de l'exutoire (amont de la vanne secteur). Cette antenne surveille la zone entre l'exutoire et la partie aval du plan de grille et permet de détecter des poissons qui **approchent** l'exutoire de dévalaison. Cette antenne a été ajoutée pour le suivi 2018 et n'était pas présente pour le suivi 2017,

- **P_e** : une antenne multi-brins en aval immédiat de la vanne secteur afin de valider le **passage** de poissons par **l'exutoire**. Cette antenne permet également de contrôler la reprise de la dévalaison après le franchissement ou la stagnation au pied du clapet,

- **P** : une antenne boucle aérienne, située une centaine de mètres en aval de l'exutoire. Cette antenne a 2 fonctions : elle permet de confirmer les **passages par l'exutoire** de dévalaison mais également d'enregistrer le **passage de poissons par la vanne toit** située en rive gauche de la prise d'eau,

- **R** : 2 antennes boucles aériennes, situées en aval (rive droite et rive gauche) du **barrage**, afin d'enregistrer les poissons ayant franchi le barrage et dévalant par le tronçon court-circuité,

- **C** : une antenne multi-brins dans le **canal d'amenée** de l'usine, en aval du plan de grille. Cette antenne enregistre les poissons franchissant la prise d'eau en traversant les grilles.

Au total, 22 stations d'enregistrement ont été utilisées en 2017 et 23 en 2018. A cela s'ajoutent 2 postes utilisés pour le suivi mobile lors de chaque lâcher de poissons.

Après avoir installé les antennes, une calibration (réglage des gains d'intensité) a été menée afin d'adapter la portée de détection de chaque antenne à la taille des zones à suivre. L'enjeu a été de régler les antennes de façon à ne pas capter les poissons se présentant dans d'autres zones d'intérêt. L'ajustement des gains s'est basé sur les forces du signal obtenues pour chaque zone allant de 90 (en périphérie de zone) à 150 (au centre de la zone). Les forces de signal ont été ensuite utilisées pour attribuer les différentes voies de passage des poissons marqués (cf. 3.2.3).

La durée d'écoute d'un émetteur, nécessaire pour le détecter et décoder, est ajustable pour chaque récepteur. Cette durée d'écoute comporte deux paramètres à régler : le temps nécessaire pour détecter la présence d'émetteur dans la zone surveillée, et le temps pour décoder l'identifiant de l'émetteur. Pour optimiser ce réglage, la taille des zones de réception, la vitesse de déplacement de l'espèce étudiée et la fréquence d'émission de signal des émetteurs sont à considérer. Compte-tenu des retours d'expérience sur ce type d'études (notamment le suivi de la dévalaison des smolts de saumon atlantique au niveau de l'ouvrage Tuilières sur la Dordogne : ECOGEA, 2017), de la petite taille de certaines zones de réception pour la présente étude et de la forte fréquence d'émission du signal choisie pour les émetteurs, la durée de détection d'un émetteur a été fixée à 3 s et la durée d'identification du code à 6 s sur tous les récepteurs de l'étude. (n.b. pour décoder l'identifiant d'un émetteur, le récepteur doit capter au moins 3 signaux. Avec 45 ppm, il faut en théorie $3 \times 1.33 \text{ s} = 4 \text{ s}$ de temps d'écoute).

Antennes de détection:

E Entrée **A** Approche **P_e** **P** Passage **C** Canal d'aménée **R** Rivière

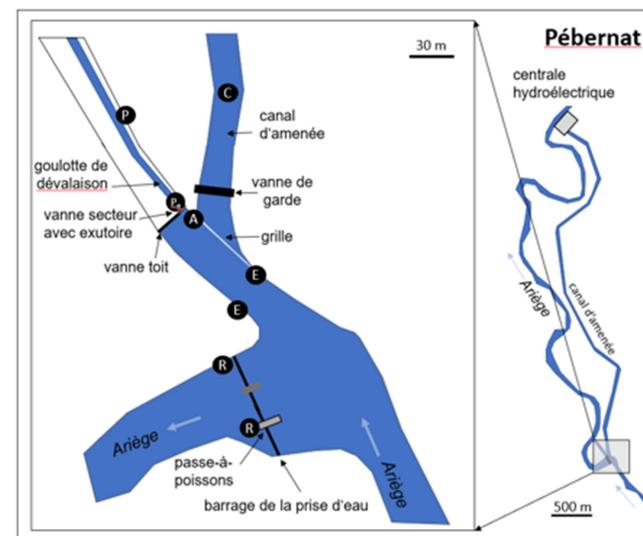
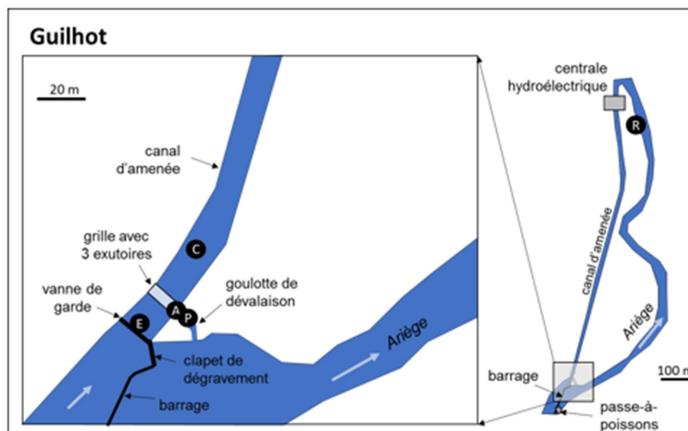
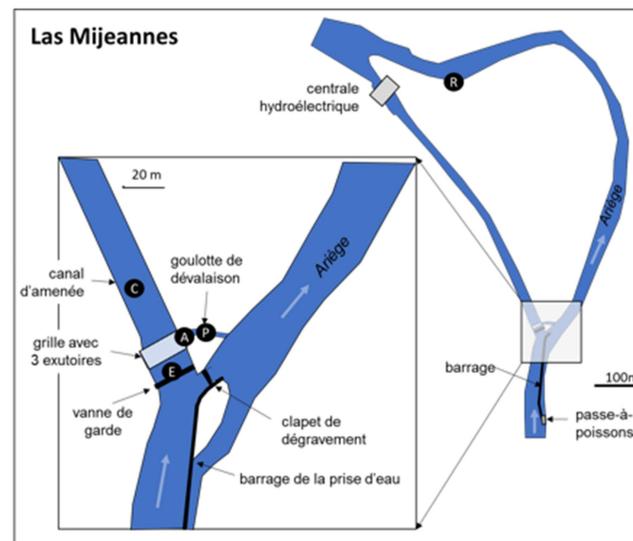
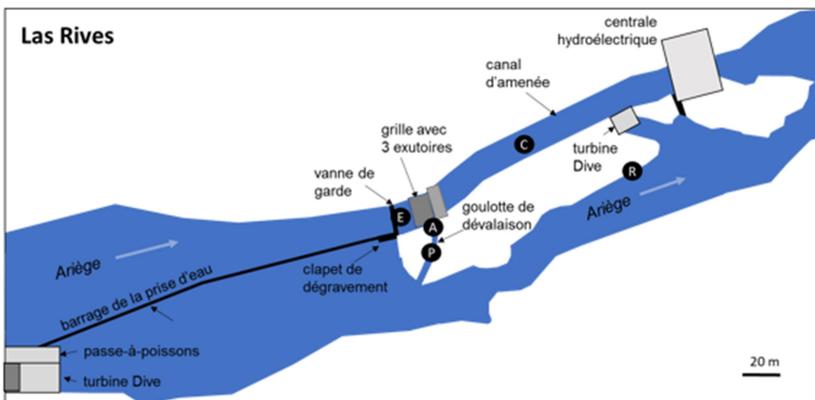


Figure 7 : plans des sites d'étude et leur équipement en antennes de détection.

3.2.2 Suivi complété par le tracking mobile

Des suivis mobiles avec une antenne aérienne et une antenne fouet installée sur le toit d'un véhicule ont été menés afin de s'assurer de la position des smolts par rapport aux données des stations d'enregistrement fixes. Par exemple, s'assurer qu'un smolt n'ayant pas été enregistré comme franchissant un ouvrage se trouve réellement en amont de celui-ci. Deux à trois suivis mobiles ont été menés systématiquement dans les 5 jours après chaque lâcher (J+1 et/ou J+2 et/ou J+5) en prospectant le maximum du linéaire accessible du tronçon étudié. Ces différents suivis ont également permis de contrôler la durée de vie des émetteurs.

3.2.3 Analyses des données de passage

3.2.3.1 Attribution des voies de passage

Tous les enregistrements obtenus au cours des deux campagnes de suivi ont été vérifiés et les forces de signal enregistrées analysées. Pour chaque code de chaque fréquence, des graphiques d'évolution de signal ont été réalisés par site (Figure 8). Les voies de passages ont été déterminées pour chacun des poissons suivis : le passage à proximité d'une antenne est validé si le signal enregistré approche le signal maximal possible de l'antenne déterminé lors de la calibration (entre 120 et 150 selon l'antenne).

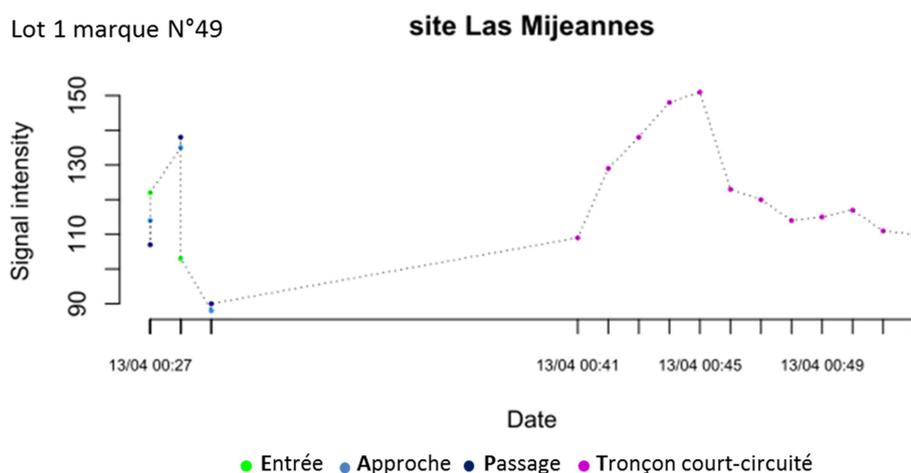


Figure 8 : exemple de graphique d'évolution du signal généré pour un poisson passé par le site de Las Mijeannes (signal supérieur à 120 indique la proximité du poisson par rapport à l'antenne).

A noter que sur l'ensemble des sites, les passages « barrage » ont été obtenus par déduction : passage par le tronçon court-circuité (antenne R) sans enregistrement à la prise d'eau. Il n'est donc pas possible de distinguer les passages par surverse lors de forts débits, des dévalaisons éventuelles par la passe à poissons, par une échancrure délivrant le complément de débit réservé ou par un clapet de dégravement.

Les poissons, passés précédemment par une turbine et arrêtés plusieurs jours au même endroit, ont été considérés comme blessés ou morts et les données collectées après leur passage par l'usine ont été écartées des traitements. Compte tenu du nombre réduit de passage par les turbines durant l'étude, le nombre de cas est très réduit.

3.2.3.2 Efficacité de la prise d'eau et de franchissement global

L'**efficacité de la prise d'eau** est définie comme la proportion de poissons protégés par les grilles fines qui empruntent avec succès les exutoires puis la goulotte de dévalaison, parmi l'ensemble des poissons entrés et détectés dans la prise d'eau. Les passages au travers des grilles ou les demi-tours des poissons (retours en amont) sont considérés comme des échecs de l'efficacité de la prise d'eau.

L'**efficacité de la prise d'eau** (Ef en %) à LASR, LASM et GUI a été calculée comme étant le nombre de poissons détectés dans la goulotte de dévalaison ($nb(EXU)$) divisé par le nombre de poissons détectés à l'entrée de la prise d'eau ($nb(PE)$), exprimé en pourcentage :

$$Ef (\%) = \frac{nb (EXU)}{nb (PE)} \times 100$$

Sur le site de PEB, nous avons distingué l'**efficacité de l'exutoire** (Ef_{exu} en %) calculée comme étant le nombre des poissons détectés à l'exutoire et dans la goulotte de dévalaison ($nb(EXU)$) divisé par le nombre de poissons détectés à l'entrée de la prise d'eau ($nb(PE)$), exprimé en pourcentage :

$$Ef_{exu} (\%) = \frac{nb (EXU)}{nb (PE)} \times 100$$

et l'**efficacité de passage par la vanne toit** (Ef_{vt} en %) calculée comme étant le nombre de poissons passés par la vanne-toit ($nb(VT)$), obtenu par différence entre le nombre de poissons détectés dans le canal de décharge et le nombre de poissons par l'exutoire, divisé par le nombre de poissons détectés à l'entrée de la prise d'eau ($nb(PE)$), exprimé en pourcentage :

$$Ef_{vt} (\%) = \frac{nb (VT)}{nb (PE)} \times 100$$

Le **taux global de franchissement de l'aménagement par les voies de passage considérées sans dommage pour les poissons** (Fr en %) a été également calculé comme étant le nombre de poissons qui passent par le dispositif de dévalaison ($nb(EXU)$), par la vanne toit ($nb(VT)$) ou par le barrage ($nb(BARRAGE)$) divisé par le nombre total de poissons détectés à l'aménagement (considérés vivants) et multiplié par 100 pour l'exprimer en pourcentage :

$$Fr (\%) = \frac{nb(EXU) + nb(VT) + nb(BARRAGE)}{nb(PE) + nb(BARRAGE)} \times 100$$

A partir des résultats des différents lots de poissons, l'**efficacité globale des prises d'eau peut être calculée de 2 manières** :

- Soit en sommant les poissons des différents lots passés par les différentes voies, puis en calculant l'efficacité obtenue.
- Soit en calculant l'efficacité obtenue pour chaque lot, puis en faisant la moyenne.

3.2.3.3 Temps de passage

Les temps de passage suivants ont été calculés à partir des données enregistrées au cours de l'ensemble du suivi :

Temps de passage par le dispositif de dévalaison (T_{EXU}) : sur chaque site, durée entre la première détection à l'entrée de la prise d'eau (à l'antenne E, t_{1PE}) et la détection du signal maximal dans le dispositif de dévalaison à l'antenne P (Pe pour Pébernat) ou A (pour de rares cas où l'enregistrement P ou Pe indisponible), $t_{SMax-goulotte}$ (cf. Figure 7 pour l'emplacement des antennes) :

$$T_{EXU} = |t_{1PE} - t_{SM\text{ax-goulotte}}|$$

Uniquement pour PEB, le temps de passage par la vanne toit (T_{VT}) : durée entre la première détection aux antennes amont de la prise d'eau (à l'antenne E, t_{1PE}) et la détection du signal maximal dans le canal de décharge en aval de l'exutoire de dévalaison (à l'antenne P, $t_{SM\text{ax-décharge}}$)

$$T_{VT} = |t_{1PE} - t_{SM\text{ax-décharge}}|$$

Temps de passage au travers de la grille, vers le canal d'amenée et les turbines (T_{TURB}) : durée entre la première détection à l'entrée de la prise d'eau (à l'antenne E, t_{1PE}) et la détection du signal maximal dans le canal d'amenée (à l'antenne C, $t_{SM\text{ax-canal}}$).

$$T_{TURB} = |t_{1PE} - t_{SM\text{ax-canal}}|$$

3.3 Suivis du débit de l'Ariège et du fonctionnement des aménagements

3.3.1 Débit de l'Ariège à Foix

Les données de débit de l'Ariège à l'amont du secteur de suivi proviennent de la station de la Banque Hydro de Foix (station n°O1252510).

3.3.2 Fonctionnement des aménagements hydroélectriques

3.3.2.1 Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot

Pour les sites de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot, sur l'intégralité des deux périodes de suivi des smolts (du 11 avril au 15 mai 2017 et de 19 avril au 18 mai 2018), l'exploitation des données fournies par la société Ondulia, à un pas de temps de 10 minutes, a permis d'obtenir :

- Le débit entonné par la prise d'eau (débit turbiné + débit éventuellement évacué par le déversoir de sécurité à l'amont immédiat de la centrale)
- Le débit restitué au barrage (débit réservé restitué par la passe à poissons et les organes complémentaires [échancrure ou groupe de turbinage] + débit déversé par-dessus le seuil).
- La hauteur d'eau déversante sur le seuil
- Le débit total transitant par les exutoires de dévalaison
- Le débit total de l'Ariège (somme des 3 débits précédents)
- La perte de charge au niveau des prises d'eau (uniquement sur les sites de Las Rives et Las Mijeannes).

Les ouvertures des vannes de dégrèvement pouvant intervenir en crue ne sont en revanche pas bancarisées précisément, mais ont été notées autant que possible.

Les modalités de calculs des différents débits sont détaillées en annexe 7.4.

3.3.2.2 Pébernat

Sur le site de Pébernat, les données d'exploitation fournies par EDF et l'équipement du site avec des sondes de niveau à ultrasons (Ijinus) ont permis d'exploiter les données suivantes dans le cadre de ce rapport :

- le débit turbiné, à un pas de temps de 1H

- la cote du niveau d'eau à l'aval de la vanne-toit, à un pas de temps de 1 minute, permettant d'évaluer si celle-ci déversait ou non du débit (la position de la vanne-toit, asservie au niveau de la retenue par un système de flotteur, n'étant pas relevée parmi les données d'exploitation).

On rappelle également que la position du clapet formant l'exutoire de dévalaison est asservie au niveau d'eau de la retenue et que son débit est fixe à $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.4 Analyses de l'influence des paramètres hydrauliques sur l'efficacité des grilles inclinées

Au niveau des 3 sites de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot équipés de prises d'eau avec des plans de grille inclinés, la disponibilité de paramètres décrivant à pas de temps fin (10 minutes) le fonctionnement hydraulique des prises d'eau a permis d'investiguer leurs éventuelles influences sur l'efficacité des dispositifs de dévalaison au travers de régressions logistiques.

3.4.1 Métriques décrivant l'efficacité

Deux métriques décrivant l'efficacité des dispositifs de dévalaison ont été retenues pour les analyses qui suivent :

- **Voie de passage de chaque poisson** s'étant présenté au niveau des prises d'eau (exutoire/turbine). L'information sur la voie de passage est une variable binaire et a été codifiée ainsi : « 1 » – passage par les exutoires de dévalaison, « 0 » – passage par turbine.

- **Passage sans hésitation par les exutoires de dévalaison.** Concernant le temps de passage, il est attendu que la grande majorité des poissons passe par le dispositif sans hésitation. Sans identifier à partir de quelle valeur le retard de franchissement deviendrait préjudiciable au succès de la migration des smolts, il a été considéré qu'un temps de passage inférieur ou égal à 5 minutes est suffisamment faible pour être sans impact significatif. Ainsi, les temps de passages inférieurs ou égaux à 5 minutes (depuis la première présentation du poisson devant le plan de grille) ont été considérés comme succès et codifiés comme « 1 ». Les temps de passage supérieurs, reflétant des hésitations, ont été codifiés comme « 0 ».

3.4.2 Sélection des variables explicatives

5 variables d'intérêt ont été présélectionnées pour le modèle :

- **Débit transitant par le canal d'aménagé (Q_{ch})** qui influence directement les champs de vitesses (normales et tangentielles) au niveau des prises d'eau.

- **Débit total transitant par les exutoires de dévalaison ($Q_{exu\%}$)** exprimé en tant que proportion du débit concurrent transitant par le canal d'aménagé vers la centrale ($Q_{exu\%} = Q_{exu}/Q_{ch} \cdot 100$). Cette variable a été sélectionnée pour son influence attendue sur l'attractivité hydraulique des exutoires. Ce paramètre variait avec le niveau d'eau dans la rivière, i.e. avec le débit total de la rivière.

- **Taille du poisson (LT)**, proportionnelle à la largeur du poisson qui pourrait influencer la probabilité de passage des poissons à travers la grille (un espacement inter-barreaux de 20 mm ne constituant par une barrière physique pour les smolts de moins de 20 cm).

- **Spécificité lié au site ($Site$)** en tant que variable qualitative, en particulier à Las Rives où la largeur des exutoires représente 20% de la largeur de la grille (contre 10% et 11.4% à Las Mijeannes et Guilhot respectivement) et où le haut de la grille est obstrué pour mieux diriger les écoulements du sommet du plan de grille incliné vers les exutoires.

Une 6^{ème} variable a également été examinée : la **perte de charge (PDC)** dans la mesure où cela reflète le niveau de colmatage du plan de grille avec d'éventuelles influences sur les champs de

vitesse à l'amont. Mais cette variable n'est disponible qu'à Las Rives et Las Mijeannes et a donc été évaluée sur un jeu de données plus restreint.

Pour chaque poisson, les conditions hydrauliques les plus proches du moment de l'entrée et de la sortie du poisson de la prise d'eau, et la valeur moyenne des données enregistrées pendant la présence du poisson dans la prise d'eau, ont été extraites. La comparaison graphique des valeurs d'« entrée », « sortie » et « moyenne » a montré très peu de différences entre ces trois « instants » caractérisant la présence du poisson autour du dispositif de dévalaison (Figure 9). Il a donc été décidé de travailler sur les données qui sont le plus proche du moment de la sortie du poisson du dispositif de dévalaison.

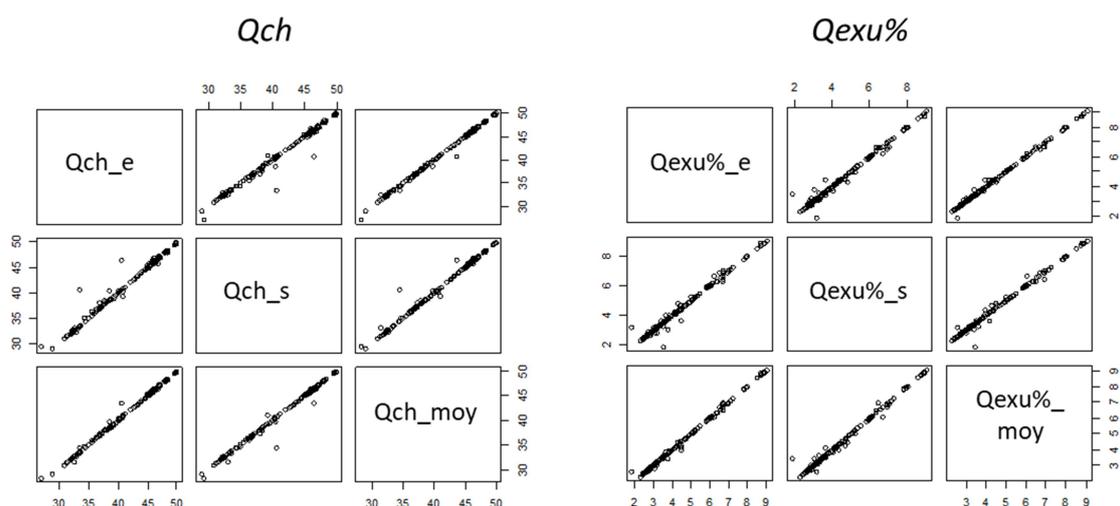


Figure 9 : corrélation des conditions du débit entonné vers la centrale hydroélectrique (*Qch*) et du débit dans la goulotte de dévalaison (*Qexu%*) au moment d'entrée (e), sortie (s) du poisson de la prise d'eau, et les valeurs moyennes (moy) des données enregistrées pendant la présence du poisson dans la prise d'eau.

3.4.3 Procédure d'analyse

1/ Dans un premier temps, le lien entre ces variables d'intérêt et les métriques à expliquer a été examiné, un par un, par des régressions logistiques simples. La **régression logistique** permet de mesurer l'association entre la survenue d'un évènement (variable binaire : p. ex. passage exutoire / turbine) et le ou les facteurs susceptibles de l'influencer (variables explicatives). D'une manière générale, toutes les variables dont le degré de significativité est inférieur à 0,20 (c'est-à-dire avec une valeur de $p < 0,20$) lors de l'analyse univariée seront incluses dans le modèle initial de régression logistique multiple. **Il s'est avéré que *Qch* n'était lié ni à la probabilité de passage par l'exutoire, ni à la probabilité de passage sans hésitation et a été éliminé des analyses postérieures.** Cela est lié au fait que les débits transitant par les canaux d'aménage sont peu variables sur chacun des sites, les centrales ayant fonctionné à plein régime ou presque durant les 2 années de suivi.

2/ La régression logistique ordinaire multiple a été ensuite utilisée pour expliquer les variables d'intérêt binaires (voie de passage, passage sans hésitation) par les variables explicatives restantes : *Qexu%*, *LT* et *Site*. La régression logistique multiple a pour but d'isoler les effets de chaque variable, c'est-à-dire d'identifier les effets résiduels d'une variable explicative sur une variable d'intérêt, une fois pris en compte les autres variables explicatives introduites dans le modèle. Pour vérifier qu'il n'existe pas de problème de multicollinéarité entre les variables explicatives, un facteur d'inflation de la variance (VIF) a été calculé et le seuil de $VIF < 5$ a été retenu (e.g. toute variable ayant un VIF supérieur à 5, a été supprimée des modèles).

4. RESULTATS

4.1 Conditions environnementales au cours de la période d'étude

4.1.1 Débits et fonctionnement des usines contrastés en 2017 et 2018

Les deux années d'étude ont été caractérisées par des débits très différents durant les périodes de tests (Figure 10).

En 2017, le débit moyen journalier à Foix a varié de 31 à 59 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre le 11 avril et le 11 mai (Figure 10). Avec ces valeurs de débit, les centrales hydroélectriques ont fonctionné à plein régime ou presque et il n'y a eu que peu, voire pas de déversement aux barrages. La vanne-toit de Pébernat a déversé durant environ 38% du temps pendant le suivi. En 2017, 4 lâchers ont été réalisés, pour des débits compris entre 41 et 49 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, proches du module à Foix (39,1 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

A contrario en 2018, le débit moyen journalier à Foix a varié de 68 à 152 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ entre le 19 avril et le 19 mai (Figure 10). Avec ces valeurs de débit, les centrales hydroélectriques ont fonctionné à plein régime, avec toutefois des arrêts pendant les pics de crue afin de mettre en sécurité les aménagements. Des déversements importants au niveau des barrages se sont produits durant toute la période de test. La vanne-toit de Pébernat a notamment déversé en permanence. Les 4 lâchers en 2018 ont été réalisés pour des débits à Foix compris entre 68 et 100 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, soit de 1,7 à 2,5 fois le module.

Le fonctionnement des usines est détaillé en annexe 7.3.

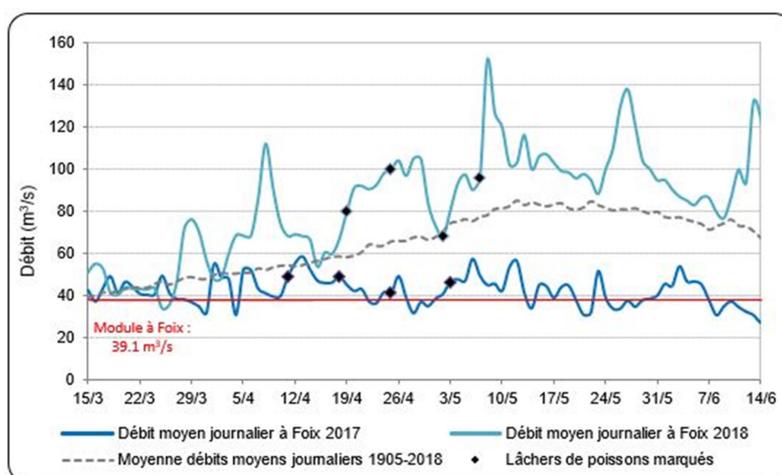


Figure 10 : débit moyen journalier de l'Ariège à Foix durant les périodes d'étude 2017 et 2018 (en comparaison avec le débit moyen journalier de la période 1905-2018). Les dates des lâchers sont représentées par des losanges noirs. La ligne horizontale rouge représente le module de l'Ariège à Foix.

4.2 Progression des poissons sur le tronçon d'étude au cours de la première semaine de suivi et entraînement dans les prises d'eau

Parmi les poissons lâchés en amont, la proportion d'individus ayant franchi tout le secteur d'étude au cours des 7 jours de suivi de chaque lot est très différente entre les deux années de suivi (Tableau 3). En 2017, année de faible hydrologie, uniquement 31% d'individus ont parcouru tout le secteur. En 2018, ce chiffre a augmenté à 65%. Le temps mis par les poissons pour traverser ce tronçon a également varié entre les années. 75% des individus ont mis moins de 4 jours et 12 heures pour parcourir celui-ci en 2017, alors qu'en 2018, 75% des individus migrants l'ont traversé en moins

de 5 heures et 50 minutes. Il apparait donc qu'en 2018, l'année avec l'hydrologie soutenue, plus d'individus ont migré et plus rapidement.

Il est important de rappeler que le suivi des poissons a été uniquement mené pendant une semaine après leur lâcher compte-tenu de la faible durée de vie des émetteurs radio. Les chiffres présentés ci-dessus ne correspondent donc pas aux réels taux de migration des poissons sur le secteur, davantage de mouvement de dévalaison ayant pu se produire après l'arrêt du suivi de chaque lot.

Tableau 3 : taux et temps de progression des poissons sur le tronçon étudié au cours de la première semaine après leur lâcher.

Taux de progression des poissons au cours de la première semaine du suivi		
Nombre de poissons lâchés à l'amont de Las Rives passés Pébernat	2017	2018
	49	100
	15	65
Proportion (%)	31	65

Temps de passage sur le tronçon au cours de la première semaine du suivi		
	2017	2018
Min	26:28:00	2:16:00
Médiane	54:16:00	3:21:00
3^e quartile	4J 12:58:00	5:50:30
Max	5J 12:52:00	6J 12:48:00

Sur les sites de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot (avec des débits d'équipement entre 75 % et 107 % du module), la grande majorité des poissons, 85% à 91%, ont été entraînés vers les prises d'eau en 2017 (Figure 11). En revanche, en 2018, les déversements d'eau par les barrages ont été continus offrant ainsi une voie de dévalaison supplémentaire, parfois plus attractive. Ceci a été surtout observé à Guilhot avec uniquement 25% des poissons entraînés vers la prise d'eau en 2018, et dans une moindre mesure à Las Rives (65% en 2018 contre 91% en 2017). A Las Mijeannes, le taux d'entraînement dans les prises d'eau est resté important les deux années de suivi.

Les forts taux d'entraînement observés pour Pébernat (96 % et 95 %) ne sont pas comparables à ceux des 3 autres sites du fait de la présence de la vanne-toit, ouvrage évacuateur prioritaire, au sein de la prise d'eau. Cette configuration explique les fortes valeurs observées les 2 années.

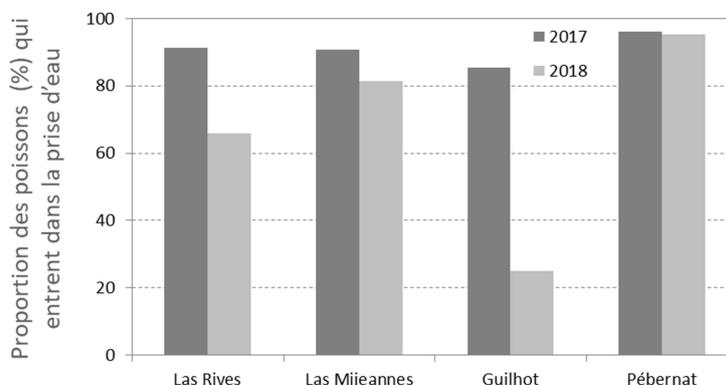


Figure 11 : proportion (%) des poissons qui sont rentrés dans les prises d'eau parmi tous les poissons migrants, par site et année d'étude.

4.3 Nombre d'individus détectés sur chacun des sites

Le nombre de poissons (199 individus lâchés au total) et la stratégie de déversement des différents lots visaient 1/ à obtenir un nombre suffisant d'individus entrés dans chaque prise d'eau pour en évaluer l'efficacité de manière précise et 2/ à équilibrer le nombre de poissons détectés au niveau de chaque prise d'eau. Au final, on dénombre entre 113 et 137 poissons enregistrés au niveau de chaque site étudié, avec notamment plus de 100 individus qui sont rentrés dans les prises d'eau de Las Rives, Las Mijeannes et Pébernat (chiffres entre parenthèses dans le Tableau 4). A Guilhot, uniquement 53 individus sont entrés dans la prise d'eau en raison de son plus faible débit d'équipement, ce qui reste tout de même un chiffre significatif et permet d'évaluer l'ordre de grandeur de son efficacité.

Tableau 4 : nombres de poissons détectés sur chaque site (entre parenthèses à la prise d'eau PE) pour chaque lot et leurs tailles.

Lot	Date de lâcher	Nombre d'ind. lâchés	Nb d'ind. détectés au site (PE) de			
			Las Rives	Las Mijeannes	Guilhot	Pébernat
2017						
1	11/04/2017	24	21 (18)	15 (12)	10 (7)	8 (8)
2	18/04/2017	25	25 (24)	15 (15)	14 (12)	7 (7)
3	25/04/2017	25	-	-	-	22 (21)
4	03/05/2017	25	-	24 (22)	17 (16)	15 (14)
<i>Sous-total 2017</i>		99	46 (42)	54 (49)	41 (35)	52 (50)
<i>Taille min-max</i>			161-187	160-186	160-186	159-186
<i>(mm) moyenne</i>			175.0	174.7	175.2	172.4
2018						
5	19/04/2018	25	23 (18)	23 (23)	23 (4)	22 (21)
6	25/04/2018	25	23 (10)	19 (15)	16 (3)	16 (16)
7	02/05/2018	25	22 (14)	19 (15)	15 (9)	9 (9)
8	07/05/2018	25	23 (18)	19 (14)	18 (2)	17 (15)
<i>Sous-total 2018</i>		100	91 (60)	80 (65)	72 (18)	64 (61)
<i>Taille min-max</i>			163-190	164-190	168-190	164-190
<i>(mm) moyenne</i>			177.4	177.0	180.7	177.5
TOTAL 2017-2018		199	137 (102)	134 (114)	113 (53)	116 (111)
Taille min-max			161-190	160-190	160-190	159-190
(mm) moyenne			176	176	178	175

Les tailles des poissons qui se sont présentés devant les prises d'eau sont similaires entre les 2 années de suivi (Tableau 4, test de Wilcoxon, $p=0,051$). Il n'existe pas non plus de différence de taille entre les poissons ayant exploré les différents sites (Tableau 4, test de Kruskal-Wallis, $p=0,49$). La taille moyenne des poissons détectés sur chaque site est comprise entre 176 et 178 mm.

4.4 Efficacité des prises d'eau et franchissement global des aménagements

4.4.1 Las Rives

L'efficacité (E_f) de la prise d'eau de Las Rives a été évaluée avec au total 102 poissons qui se sont présentés devant la prise d'eau. En sommant les poissons des différents lots passés par les différentes voies, E_f est de 86 % (Tableau 5) et 14 % de poissons sont passés à travers la grille, puis par les turbines. En fonction des lots, E_f varie de 71 à 100 % et une différence peut être observée entre les deux années de l'étude : l'efficacité est de 81 % en 2017 contre 90 % en 2018. La moyenne des efficacités des différents lots est de 88.1 %.

En considérant maintenant l'ensemble de l'aménagement de Las Rives, parmi les 137 franchissements enregistrés au total (Tableau 5), 88 smolts (soit 64,2 %) ont emprunté le dispositif de dévalaison (exutoires + goulotte de dévalaison), 35 (soit 25,5 %) sont passés par le barrage et 14 smolts (soit 10,2 %) sont passés à travers la grille vers les turbines. La proportion totale des poissons qui ont franchi l'aménagement de Las Rives par les voies de dévalaison considérées sans dommage (*Fr*) est donc de 90 % sur l'ensemble des deux années d'étude, 83 % en 2017 et 93 % en 2018.

Tableau 5 : synthèse des voies de passage à Las Rives, efficacité de la prise d'eau (PE) et franchissement global de l'aménagement par les voies saines.

Las Rives							
Lots	Nb total de franchissement	Nb d'individus détectés à/au				Efficacité <i>Ef</i> de la PE	Franchissement global <i>Fr</i> par les voies saines
		Barrage	Entrée PE	Exutoire/goulotte	Turbine		
1	21	3	18	17	1	94%	95%
2	25	1	24	17	7	71%	72%
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
Sous-total 2017	46	4	42	34	8	81%	83%
5	23	5	18	18	0	100%	100%
6	23	13	10	10	0	100%	100%
7	22	8	14	12	2	86%	91%
8	23	5	18	14	4	78%	83%
Sous-total 2018	91	31	60	54	6	90%	93%
Total	137	35	102	88	14	86%	90%

4.4.2 Las Mijeannes

Au total, 114 poissons se sont présentés devant la prise d'eau de Las Mijeannes. En sommant les poissons des différents lots passés par les différentes voies, *Ef* est de 88 % (Tableau 6), 12 % des poissons sont passés à travers la grille fine, puis par les turbines. En fonction des lots, *Ef* varie de 73 à 100 %. Comme pour Las Rives, il y a une différence entre les deux années d'étude : *Ef* est de 80 % en 2017 contre 94 % en 2018. La moyenne des efficacités des différents lots est de 87,9 %.

Sur l'ensemble de l'aménagement de Las Mijeannes, parmi les 134 franchissements enregistrés au total, 100 smolts (soit 74,6 %) ont emprunté le dispositif de dévalaison, 20 smolts (soit 14,9 %) sont passés par le barrage et 14 smolts (soit 10,5 %) sont passés à travers la grille vers les turbines. Au final, *Fr* de Las Mijeannes est donc de 90 % (81 % en 2017 et 95 % en 2018).

Tableau 6 : synthèse des voies de passage à Las Mijeannes, efficacité de la prise d'eau (PE) et franchissement global de l'aménagement par les voies saines.

Las Mijeannes							
Lots	Nb total de franchissement	Nb d'individus détectés à/au				Efficacité <i>Ef</i> de la PE	Franchissement global <i>Fr</i> par les voies saines
		Barrage	Entrée PE	Exutoire/goulotte	Turbine		
1	15	3	12	10	2	83%	87%
2	15	0	15	13	2	87%	87%
3	-	-	-	-	-	-	-
4	24	2	22	16	6	73%	75%
Sous-total 2017	54	5	49	39	10	80%	81%
5	23	0	23	23	0	100%	100%
6	19	5	14	13	1	93%	95%
7	19	4	15	12	3	80%	84%
8	19	6	13	13	0	100%	100%
Sous-total 2018	80	15	65	61	4	94%	95%
Total	134	20	114	100	14	88%	90%

4.4.3 Guilhot

A Guilhot en 2018, 3 poissons ont franchi l'ouvrage sans enregistrement et ont par la suite été enregistrés sur le site aval. Un passage barrage a été attribué à ces poissons par déduction (ces individus ont été très probablement manqués par l'antenne R) et ils sont comptés dans le calcul de franchissement de l'aménagement.

Sur les 113 smolts qui ont franchi l'aménagement, uniquement 53 se sont présentés devant la prise d'eau de Guilhot (Tableau 7). En sommant les poissons des différents lots passés par les différentes voies, *Ef* de cette prise d'eau est de 96 %. On dénombre 4 % des poissons qui sont passés à travers la grille vers les turbines (2/53). En fonction des lots, *Ef* varie de 87,5 à 100 %, mais les effectifs de certains lots restent assez faibles. Une légère différence d'*Ef* est également observée sur Guilhot entre les deux années de l'étude : *Ef* est de 94,3 % en 2017 et 100 % en 2018. La moyenne des efficacités des différents lots est de 98.2 %.

Sur le site de Guilhot, parmi les 113 franchissements enregistrés au total, 51 smolts (soit 45,1 %) ont emprunté le dispositif de dévalaison (exutoires + goulotte de dévalaison), 2 smolts (soit 1,8 %) sont passés à travers la grille vers les turbines et 60 smolts (soit 53,1 %) sont passés par le barrage. *Fr* de l'aménagement de Guilhot qui en résulte est de 98 % sur l'ensemble des deux années d'étude (95 % en 2017 et 100 % en 2018).

Tableau 7 : synthèse des voies de passage à Guilhot, efficacité de la prise d'eau (PE) et franchissement global de l'aménagement par les voies saines.

Guilhot							
Lots	Nb total de franchissement	Nb d'individus détectés à/au				Efficacité <i>Ef</i> de la PE	Franchissement global <i>Fr</i> par les voies saines
		Barrage	Entrée PE	Exutoire/goulotte	Turbine		
1	10	3	7	7	0	100%	100%
2	14	2	12	12	0	100%	100%
3	-	-	-	-	-	-	-
4	17	1	16	14	2	87,5%	88%
Sous-total 2017	41	6	35	33	2	94,3%	95%
5	23	19	4	4	0	100%	100%
6	16	13	3	3	0	100%	100%
7	15	6	9	9	0	100%	100%
8	18	16	2	2	0	100%	100%
Sous-total 2018	72	54	18	18	0	100%	100%
Total	113	60	53	51	2	96%	98%

4.4.4 Pébernat

111 poissons se sont présentés devant la prise d'eau (Tableau 8) et ont contribué à l'évaluation de son efficacité. En sommant les poissons des différents lots passés par les différentes voies, 89 % de ces poissons ont été protégés par la grille (*Ef*) : 23 % (chiffre arrondi) ont dévalé par l'exutoire (*Ef exu*) et 67 % ont dévalé par la vanne toit (*Ef vt*). Située à proximité de l'exutoire de dévalaison, la vanne-toit a offert une voie de passage très attractive pour les poissons lors de son ouverture. De ce fait, l'utilisation de l'exutoire comme voie de dévalaison est très variable (*Ef exu* entre 6 % et 50 %, *Ef vt* entre 21 % et 94 %). A Pébernat, 10,8 % des smolts (12 individus) sont passés à travers la grille vers les turbines, mais uniquement en 2017 et aucun passage vers les turbines n'a été observé en 2018. En fonction des lots, *Ef* de cette prise d'eau varie de 71 % à 100 %. Une différence importante d'*Ef* apparaît entre les deux années de l'étude : 76 % en 2017 contre 100 % en 2018. Cette augmentation d'efficacité en 2018 est liée à l'ouverture de la vanne toit tout au long de la période d'étude, qui

évacuait le débit excédentaire non turbiné à l'usine. La moyenne des efficacités des différents lots est de 89.3 %.

Concernant l'ensemble de l'aménagement (prise d'eau et barrage), sur 116 poissons s'étant présentés à l'amont, 74 ont franchi par la vanne toit (soit 64 %), 25 ont emprunté l'exutoire (soit 22 %) et 12 smolts sont passés à travers la grille vers les turbines (soit 10 %). Seuls 5 poissons sont passés directement par le barrage, sans s'approcher de la prise d'eau (soit 4 %). *Fr* de l'aménagement de Pébernat est de 90 % (77 % en 2017 et 100 % en 2018).

Tableau 8 : synthèse des voies de passage à Pébernat, efficacité de la prise d'eau (PE) et franchissement global de l'aménagement par les voies saines.

Pébernat										
Lots	Nb total de franchissement	Nb d'individus détectés à/au					Efficacité de la PE			Franchissement global <i>Fr</i> par les voies saines
		Barrage	Entrée PE	Exutoire/ goulotte	VT	Turbine	<i>Ef exu</i>	<i>Ef vt</i>	Total	
1	8	0	8	1	7	0	13%	88%	100%	100%
2	7	0	7	3	2	2	43%	29%	71%	71%
3	22	1	21	7	8	6	33%	38%	71%	73%
4	15	1	14	7	3	4	50%	21%	71%	73%
Sous-total 2017	52	2	50	18	20	12	36%	40%	76%	77%
5	22	1	21	2	19	0	10%	90%	100%	100%
6	16	0	16	1	15	0	6%	94%	100%	100%
7	9	0	9	1	8	0	11%	89%	100%	100%
8	17	2	15	3	12	0	20%	80%	100%	100%
Sous-total 2018	64	3	61	7	54	0	11%	89%	100%	100%
Total	116	5	111	25	74	12	23%	67%	89%	90%

Grâce à l'enregistrement de la hauteur d'eau au pied de la vanne toit, il est possible de dissocier les franchissements de la prise d'eau de Pébernat en fonction de l'ouverture de la vanne toit (Tableau 9). En 2017, malgré une hydrologie faible et un taux d'ouverture de la VT inférieur à 40 % du temps de suivi, il y a eu 80 % des franchissements de l'ouvrage qui se sont déroulés lorsque la VT était ouverte (39 franchissements sur 49). Parmi ces franchissements, 20/39 ont été effectués par la VT (*Ef vt* = 51 %), 12/39 par l'exutoire de dévalaison (*Ef vt* = 31 %) et enfin 7/39 au travers du plan de grille vers les turbines (18 %). Lorsque la VT était fermée, seulement 10 franchissements ont été enregistrés : 5 poissons par l'exutoire de dévalaison (*Ef exu* = 50 %) et 5 poissons par les turbines (50 %).

En 2018, la vanne toit est restée constamment ouverte en raison de l'hydrologie soutenue. Ainsi, aucun franchissement n'a été enregistré avec la VT fermée. Concernant les franchissements avec la VT ouverte (n = 61), 54/61 ont été effectués par la vanne toit (*Ef vt* = 89 %) et 7/61 par l'exutoire de dévalaison (*Ef exu* = 11 %). Aucune traversée du plan de grille n'a été enregistrée pendant le suivi 2018.

Le bilan sur les deux années de suivi est donc le suivant :

- Lorsque la VT est ouverte, 74 % des passages se font par la vanne toit (74/100, *Ef vt*), 19 % par l'exutoire (19/100, *Ef exu*) et 7 % au travers du plan de grille (7/100). *Ef* la prise d'eau est donc de 93 % lorsque la vanne est ouverte,
- Lorsque la VT est fermée, *Ef* n'est que de 50 %, mais ce résultat est à relativiser puisqu'il n'est obtenu que sur un effectif de 10 individus suivis dans cette configuration sur l'ensemble des deux années d'étude.

Tableau 9 : comparaison des franchissements de la PE de Pébernat en fonction de l'ouverture de la vanne toit.

*un franchissement par l'exutoire a été enregistré le 14/04/17, avant l'enregistrement de l'ouverture de la vanne toit, il n'est pas possible d'allouer un positionnement de la vanne à ce franchissement, ce qui explique les effectifs différents avec le Tableau 8.

Pébernat		Nb total de franchissement	VT ouverte	Répartition	VT fermée	Répartition
2017	passages exutoire	17*	12	31%	5	50%
	passages VT	20	20	51%	-	-
	passages turbine	12	7	18%	5	50%
sous-total 2017		49*	39		10	
2018	passages exutoire	7	7	11%	0	0%
	passages VT	54	54	89%	-	-
	passages turbine	0	0	0%	0	0%
sous-total 2018		61	61		0	
2017 et 2018	passages exutoire	24*	19	19%	5	50%
	passages VT	74	74	74%	-	-
	passages turbine	12	7	7%	5	50%
Total		110*	100		10	

4.5 Temps de passage des poissons selon les voies

Pour rappel, le pas de temps des enregistreurs ATS® est fixé à 1 minute (l'enregistrement à la seconde n'est pas possible). Les calculs réalisés avec les données recueillies ont donc une précision de l'ordre de la minute. L'interprétation des résultats présentés doit donc en tenir compte, notamment pour les franchissements rapides.

4.5.1 Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot

Sur les trois sites équipés de plans de grille inclinés (Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot), les temps de passages par les exutoires (T_{EXU}) sont, en grande majorité, très rapides (Tableau 10).

T_{EXU} minimal est évalué à 1 minute sur les trois sites du fait de la précision de mesures de temps de passage. 50 % des individus passent en moins de 1 ou 2 minutes selon le site, et 75 % passent en moins de 2 ou 4 minutes à partir du moment où ils se présentent au niveau des vannes de garde des prises d'eau. Il y a ainsi peu d'écart sur les T_{EXU} entre les 3 sites, jusqu'à la valeur du 3^{ème} quartile environ. Ces écarts sont voisins de la précision de mesure et peuvent être influencés par les légères différences de distances entre les vannes de garde (où se trouvent les antennes E) et les exutoires situés au sommet du plan de grille (environ 19 m à Las Rives, 12.5 m à Las Mijeannes et 18 m à Guilhot)

Des différences plus notables entre les sites apparaissent pour les plus fortes valeurs de temps de passage par les exutoires, avec par exemple des valeurs de 90^{ème} percentile égales à 5, 9 et 23 minutes pour Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot respectivement. De même, les T_{EXU} maximaux observés sont respectivement de 1h40min, 10h47min et 26h19min pour Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot.

Toutes années confondues, il existe une différence de T_{EXU} entre les sites (test de Kruskal-Wallis, $p = 0,0125$). Lors des comparaisons deux à deux, il est identifié que les T_{EXU} à Las Mijeannes sont plus rapides que sur les deux autres sites (Test de Wilcoxon, LASR-LASM : $p = 0,037$; LASM-GUI : $p = 0,03$; LASR-GUI : $p = 0,38$), cette différence étant à relativiser car essentiellement liée aux écarts de 1 à 2 minutes jusqu'à la valeur du 3^{ème} quartile, et ne reflétant pas les écarts plus importants sur les fortes valeurs.

Les temps de passage au travers des grilles, puis par les turbines (T_{TURB}) apparaissent globalement plus élevés que les T_{EXU} , même en considérant que les distances entre les antennes E et C (environ 65, 40 et 40 m à Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot) sont plus importantes que les distances entre les antennes E et A ou P. Les poissons semblent davantage hésiter à passer au travers des grilles, qu'à s'engager dans les exutoires, la différence entre T_{EXU} et T_{TURB} n'étant significative qu'à Las Rives (test de Wilcoxon, Las Rives : $p < 0.001$; Las Mijeannes : $p = 0,085$).

A Las Rives et Las Mijeannes, 50 % des individus qui passent au travers des grilles le font en moins de 9 et 2 minutes respectivement, et 75 % le font en moins de 27 et 19 minutes respectivement, suggérant un passage au travers des grilles plus rapide à Las Mijeannes (la différence n'étant toutefois pas statistiquement significative ; test de Wilcoxon, $p = 0,081$). A Guilhot, seulement 2 individus constituent l'échantillon de poissons passés turbines, le premier en 3 minutes et le second en 10h03.

Tableau 10 : temps de passage par les exutoires et par les turbines sur les sites équipés de plans de grilles inclinés.

	nb	Temps de passage (minutes)						
		Min	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^{ème} quartile	90 ^{ème} percentile	95 ^{ème} percentile	Max
Passage exutoire								
Las Rives	88	1	1	2	3	5	7	100
Las Mijeannes	100	1	1	1	2	9	51	647
Guilhot	51	1	1	2	4	23	46	1579
Passage turbine								
Las Rives	14	1	4	9	27	116	278	511
Las Mijeannes	14	1	1	2	19	26	31	40
Guilhot	2	3	-	-	-	-	-	603

4.5.2 Pébernat

La configuration de la prise d'eau de Pébernat est différente (plan de grille orienté), mais surtout sa taille est supérieure à celles des 3 autres sites étudiés. De ce fait, les distances entre les antennes sont plus grandes et les temps de passage calculés ne sont pas comparables à ceux des 3 autres sites.

A Pébernat (Figure 12), les temps de passage par l'exutoire (T_{EXU}) apparaissent relativement longs avec une médiane de 36 minutes et un 3^{ème} quartile de 3h12. Les passages par la vanne toit (T_{VT}) sont en revanche bien plus rapides avec une médiane de 2 minutes et un 3^{ème} quartile de 3 minutes. Si l'on compile les données de ces deux voies de franchissement, on obtient un temps médian de passage de 2 min et un 3^{ème} quartile de 17 min.

Les temps de passages au travers des grilles, puis par les turbines (T_{TURB}) sur ce site sont également plus longs que les T_{EXU} (médiane : 57 min ; 3^{ème} quartile : 10h13min).

Le temps maximal passé devant cette prise d'eau avant de s'engager dans une des voies est, lui aussi, très long : 95h50min, soit 4 jours, pour un poisson qui est finalement passé à travers la grille.

A Pébernat, les temps de passages T_{EXU} , T_{VT} et T_{EXU+VT} sont significativement plus rapides en 2018 qu'en 2017 (Figure 13 ; test de Wilcoxon, T_{EXU} : $p = 0,015$; T_{VT} : $p < 0,001$; T_{EXU+VT} : $p < 0,001$). La comparaison n'est pas possible pour les poissons passés par les turbines car aucun passage n'a été enregistré par cette voie en 2018.

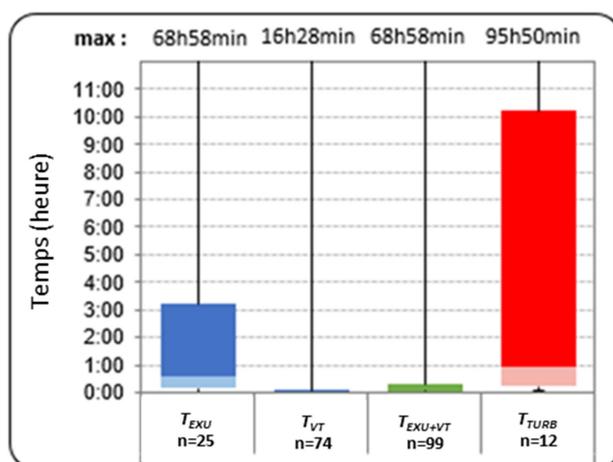


Figure 12 : temps de passage par les différentes voies de dévalaison sur le site de Pébernat (plan de grille orienté) (T_{EXU} – temps de passage par exutoire, T_{VT} – par la vanne toit, T_{TURB} – par la turbine).

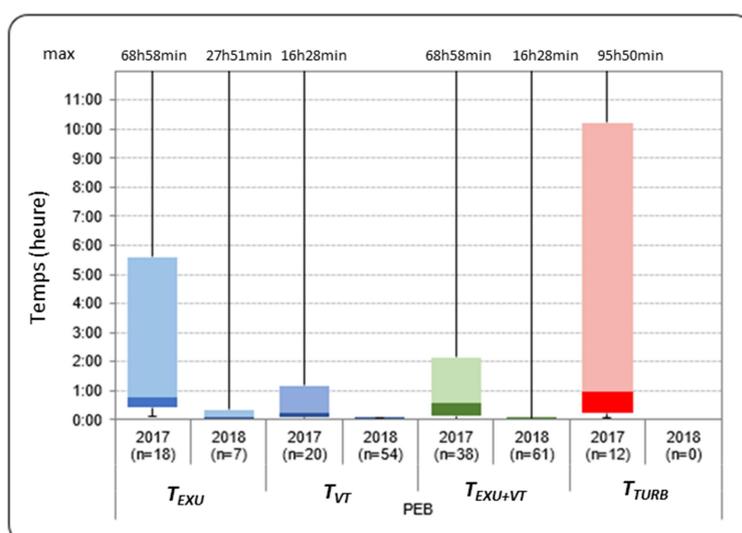


Figure 13 : temps de passage par les différentes voies de dévalaison sur Pébernat (plan de grille orienté) suivant les années de suivi (T_{EXU} – temps de passage par exutoire, T_{VT} – par la vanne toit, T_{TURB} – par la turbine).

4.6 Taille des poissons selon leur voie de passage

Sur l'ensemble de l'étude, la taille des smolts utilisés a varié de 159 mm à 190 mm (médiane par site entre 176 et 177 mm, Tableau 4). L'objectif de cette partie est de vérifier si les plus petits individus sont, ou non, passés au travers des grilles plus fréquemment que les plus grands individus et si, par conséquent, le rôle de barrière comportementale de la grille est différent en fonction de la taille des poissons.

Sur Las Rives et Las Mijeannes, les poissons passant au travers de la grille semblent légèrement plus petits par rapport aux poissons passant par le dispositif de dévalaison (Figure 14), mais cette différence n'est pas significative (test de Wilcoxon, pour Las Rives : $p = 0,07$ et pour Las Mijeannes : $p = 0,38$). Pour le site de Guilhot, seuls 2 individus sont passés par les turbines donc l'effet taille n'a pas été testé. Enfin, sur le site de Pébernat, les poissons passés par l'exutoire ou la vanne toit sont plus grands que ceux passés au travers de la grille (test de Wilcoxon, $p = 0,007$).

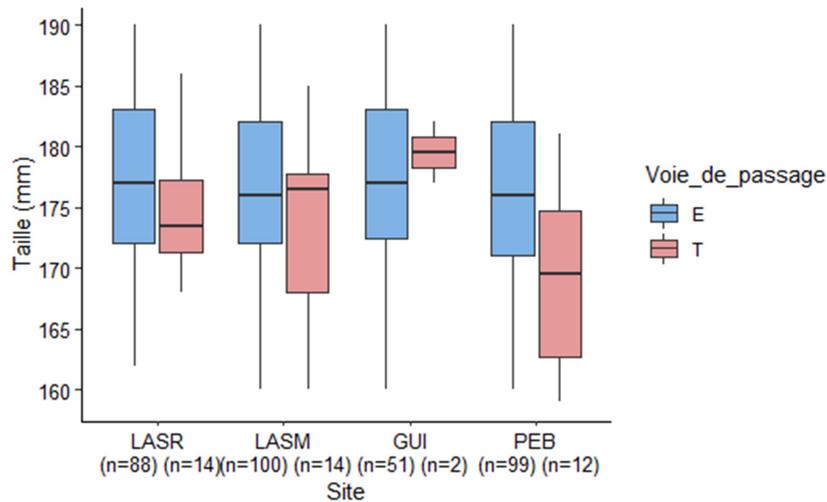


Figure 14 : comparaison des tailles des poissons passés par l'exutoire (E) ou à travers les grilles puis les turbines (T) sur les 4 sites étudiés : LASR – Las Rives, LASM – Las Mijeannes, GUI – Guilhot, PEB – Pébernat.

4.7 Influence des paramètres hydrauliques et de la taille des poissons sur l'efficacité des prises d'eau équipées de grilles inclinées

4.7.1 Probabilité de passage par les exutoires de dévalaison

Les valeurs VIF n'ont pas mis en évidence un problème de multicolinéarité. La régression logistique a montré que la **probabilité de passage** par les exutoires de dévalaison **augmente significativement avec le débit d'alimentation des exutoires** ($Q_{exu}\%$, $p = 0,02$; Figure 15). La taille du poisson (LT) et le site ont peu d'effet sur cette probabilité ($p > 0,05$).

On peut observer que la probabilité de passer par les exutoires de dévalaison est d'environ 85 % pour la valeur de dimensionnement du débit d'alimentation des exutoires $Q_{exu}\%$, égale à 3 % pour les 3 prises d'eau étudiées (Figure 15). Vers les valeurs de $Q_{exu}\%$ inférieures, la probabilité diminue rapidement, passant en-dessous de 80 % pour les $Q_{exu}\%$ en deçà de 2,5 %, avec un intervalle de confiance qui s'élargit. Vers les valeurs de $Q_{exu}\%$ supérieures, la probabilité augmente rapidement jusqu'à un $Q_{exu}\%$ de 5 %, atteignant alors environ 92 %, puis augmente de manière un peu moins prononcée au-delà.

4.7.2 Probabilité de passage par les exutoires sans hésitation

Concernant la probabilité de passage par les exutoires sans hésitation (temps de passage inférieur ou égal à 5 minutes), la régression logistique a montré **de nouveau l'importance du débit d'alimentation des exutoires $Q_{exu}\%$** ($p = 0,002$; Figure 15). La taille du poisson (LT) n'impacte pas significativement cette probabilité ($p > 0,05$). Une différence entre les sites a également été détectée : la probabilité de passage sans hésitation est supérieure à Las Rives par rapport aux deux autres sites (Las Mijeannes et Guilhot, avec $p = 0,03$ et $0,003$ respectivement). Les valeurs VIF n'ont pas mis en évidence un problème de multicolinéarité dans ce jeu de données.

La probabilité de passage sans hésitation est d'environ 80 % pour la valeur de dimensionnement du débit d'alimentation des exutoires $Q_{exu}\%$ (égale à 3 %). Vers les valeurs de $Q_{exu}\%$ inférieures, la probabilité diminue rapidement, passant en-dessous de 70 % pour les $Q_{exu}\%$ en deçà de 1,5 %, avec un intervalle de confiance qui s'élargit. Vers les valeurs de $Q_{exu}\%$ supérieures, la probabilité augmente rapidement jusqu'à un $Q_{exu}\%$ de 5 %, atteignant alors environ 90 %, puis augmente de manière un peu moins prononcée au-delà.

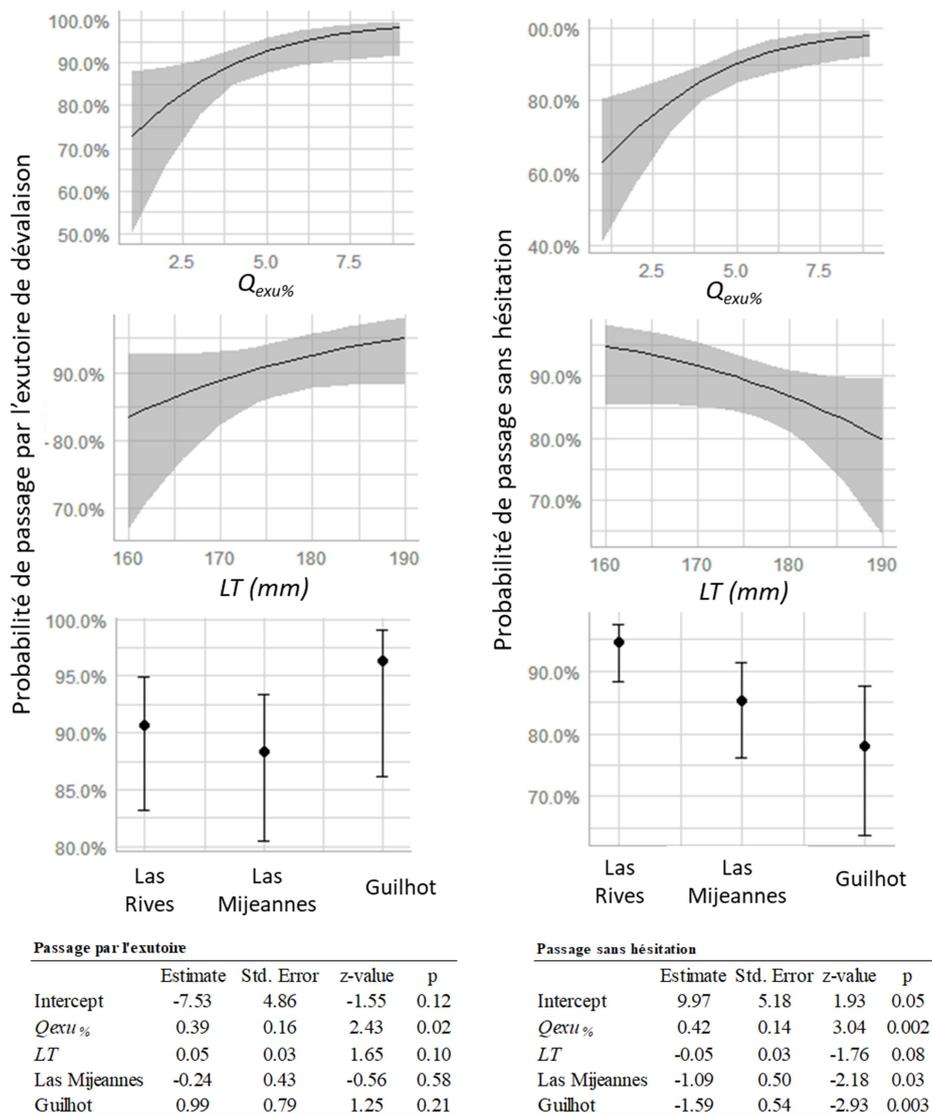


Figure 15 : résultat de la régression logistique : probabilité du passage par les exutoires de dévalaison et probabilité de passage sans hésitation en fonction du débit dans les exutoires ($Q_{exu}\%$), de la taille des poissons (LT) et du site d'étude.

4.7.3 Zoom sur la perte de charge à Las Rives et Las Mijeannes

Pour rappel, la perte de charge à la grille (PDC), reflétant le niveau de colmatage du plan de grille avec d'éventuelles influences sur les champs de vitesses à l'amont, a pu être calculée uniquement sur les sites de Las Rives et de Las Mijeannes. Il existe une différence de PDC lors des passages de poissons entre les sites : la PDC est faible et moins variable sur Las Rives (en moyenne 4,1 cm ; min - max : 1,6 – 4,8 cm), et plus importante sur Las Mijeannes (en moyenne 10,1 cm ; min - max : 4,3 – 13,5 cm, Figure 16).

Aucune relation significative n'a été démontrée par la régression logistique univariée entre la probabilité de passage par les exutoires de dévalaison et PDC (Figure 17, $p = 0,9$). Dans la gamme de valeurs observées dans notre étude, la perte de charge n'a donc pas eu d'impact sur l'efficacité des prises d'eau.

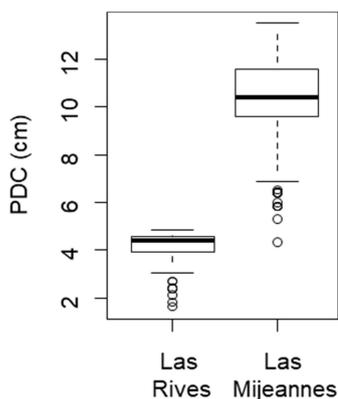


Figure 16 : box-plots de la perte de charge (PDC) sur Las Rives et Las Mijeannes au moment de passage des poissons.

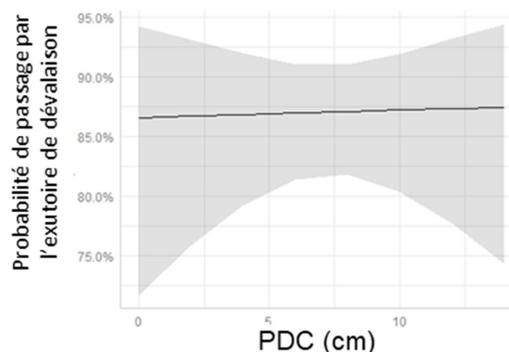
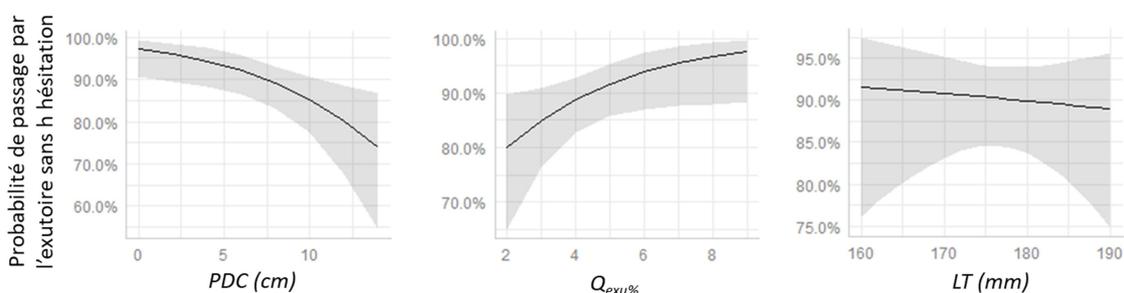


Figure 17 : régression logistique simple : probabilité de passage par l'exutoire de dévalaison en fonction de la perte de charge sur la grille (PDC).

Par contre, concernant la probabilité de **passage** par les exutoires **sans hésitation**, la régression logistique simple a montré un lien avec la *PDC* ($p = 0,03$) qui a été incluse dans le modèle avec les autres variables explicatives ($Q_{exu}\%$, LT et $Site$). Le calcul de VIF du modèle complet a cependant indiqué un problème de multicollinéarité entre *PDC* et $Site$. Par conséquent, il a été décidé d'éliminer la variable $Site$ pour pouvoir examiner l'impact de la *PDC*. La régression logistique a ensuite montré **de nouveau l'importance du débit d'alimentation des exutoires $Q_{exu}\%$** ($p = 0,04$; Figure 18) mais **également le rôle de la perte de charge** ($p = 0,01$). La probabilité de passage sans hésitation est très forte ($> 90\%$) lorsque la *PDC* est inférieure à 7 cm, puis diminue lorsque la *PDC* augmente au-delà (Figure 27). La relation avec $Q_{exu}\%$ reste similaire à celle déjà présentée dans la partie 4.7.2. Aucun effet n'a été détecté avec LT ($p > 0.05$).



Résultat de la régression logistique:

Passage sans hésitation

	Estimate	Std. Error	z-value	p
Intercept	3.84	5.97	0.64	0.52
PDC	-0.18	0.07	-2.61	0.01
$Q_{exu}\%$	0.33	0.16	2.04	0.04
LT	-0.01	0.03	-0.31	0.76

Figure 18 : résultat de la régression logistique : probabilité de passage sans hésitation en fonction de la perte de charge (PDC) et du débit dans l'exutoire de dévalaison ($Q_{exu}\%$) et de la taille des poissons (LT) (données provenant de Las Rives et Las Mijeannes uniquement).

4.8 Comparaison d'efficacité avec les anciens dispositifs de dévalaison

Des travaux précédents (Lauters & Segura, 1998; Croze, 2008) ont établi l'efficacité des dispositifs de dévalaison présents sur les 4 sites d'étude avant l'installation des prises d'eau ichtyocompatibles. Un comparatif avec les performances des systèmes actuels est donc possible.

Antérieurement, sur tous les sites, les exutoires de dévalaison étaient associés aux plans de grille de protection des turbines existant devant les prises d'eau. Il s'agissait de plans de grille quasi-verticaux (angle $\beta > 70^\circ$), perpendiculaires à l'écoulement ou presque, avec entre 30 et 45 mm d'espacement entre les barreaux. Un exutoire par grille a été positionné en rive droite du canal d'amenée sur tous les sites avec un débit moyen transitant entre 2 % et 7,1 % du débit turbiné (Tableau 11). L'efficacité des dispositifs de dévalaison E_f a été étudiée principalement avec la technologie RFID en détectant les individus marqués par une antenne installée dans l'exutoire de dévalaison. E_f a été ensuite calculée en faisant le rapport entre ces individus détectés sur tous les individus relâchés dans le canal d'amenée. Les évaluations obtenues correspondent donc à des valeurs d' E_f minimales parce qu'il n'est pas certain que tous les individus relâchés aient bien franchi l'aménagement (cf. Tomanova et al., 2018). Seul un lot de poissons a été étudié par la radiotélémetrie à Pébernat pour suivre plus finement le déplacement des poissons en amont de la grille.

Tableau 11 : comparaison des efficacités des dispositifs de dévalaison (E_f) pour les smolts de saumon atlantique entre les anciens (Lauters & Segura, 1998; Croze, 2008) et les nouveaux dispositifs de dévalaison sur les 4 sites d'étude.

Site (étude)	Esp. barreaux (mm)	Qexu% moy	Qexu% min-max	Ef moy	Ef min-max	différence des Ef moy	p-valeur du test de Wilcoxon
Las Rives (Croze 2008)	40	4,2	3,1-6,5	39,5	12,5-63	48,6	<0,001
Las Rives (présente étude)	20	3,6	2,6-6,9	88,1	70,8-100		
Las Mijeannes (Croze 2008)	30	2,5	1,6-3,4	32,5	14-61,2	55,4	<0,001
Las Mijeannes (présente étude)	20	5,1	2,3-9,1	87,9	72,7-100		
Guilhot (Croze 2008)	32	7,1	5,0-12,0	70,8	56,3-96,1	27,4	<0,001
Guilhot (présente étude)	20	5	1,9-8,5	98,2	87,5-100		
Pébernat (Lauters & Segura 1998)	45	~2	-	64,7	35-82	24,6	<0,01
Pébernat (présente étude)	20	4		89,3	71,4-100		

Au cours des études précédentes, comme dans notre étude, plusieurs lots de poissons ont été relâchés sur chaque site. Il est donc possible de vérifier statistiquement les différences observées par un test de Wilcoxon séparément pour chaque site. On constate que les E_f actuelles sont toujours significativement supérieures aux E_f antérieures (Tableau 11 et Figure 19, pour tous les tests de Wilcoxon $p < 0.01$). Le gain en E_f représente en moyenne 48,6 % sur Las Rives, 55,4 % sur Las Mijeannes, 27,4 % sur Guilhot et 24,6 % sur Pébernat. On remarque également, sur tous les sites, une plus grande stabilité de l' E_f des nouveaux dispositifs entre les différents lots.

Il convient de vérifier si les différences observées ne proviennent pas du fait que les études précédentes déterminent les E_f minimales alors que notre étude a permis d'étudier les E_f réelles. Tomanova et al. (2018a) ont réalisé l'étude d'efficacité de 4 prises d'eau ichtyocompatibles utilisant la technologie RFID et ont obtenu, à l'instar des études de Croze (2008) et de Lauters et Segura (1998), des valeurs d' E_f minimale. En comparant leurs résultats aux résultats sur les prises d'eau d'Ariège (Figure 19), il apparaît évident que les écarts en E_f ne peuvent pas être expliqués par différentes méthodes d'évaluation ; très peu de différences sont en effet observées entre les résultats de l'étude de Tomanova et al. (2018a) et les résultats obtenus dans la présente étude.

La Figure 19 résume les résultats d'efficacité obtenus jusqu'à présent sur les prises d'eau ichtyocompatibles en France : 6 plans de grille inclinés et 2 orientés (Pébernat et Halsou).

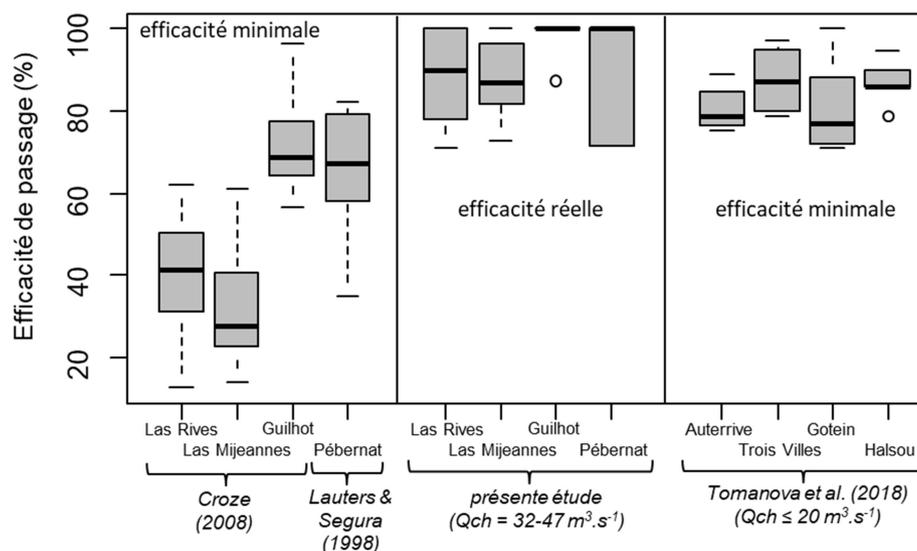


Figure 19 : comparaison des efficacités de passage (E_f) des anciens (Lauters & Segura, 1998; Croze, 2008) et des nouveaux dispositifs (présente étude) sur les 4 sites de l'Ariège, et des E_f des 4 autres sites étudiés dans Tomanova et al. (2018).

5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer pour les smolts de saumon atlantique l'efficacité E_f des prise d'eau ichtyocompatibles préconisées en France, constituées d'un plan de grille à faible espacement libre entre barreaux, incliné ou orienté, et associé à un ou plusieurs exutoire(s) de dévalaison (Courret & Larinier, 2008; Courret et al., 2015). L'étude a été conçue pour répondre à cet objectif simultanément au niveau de 4 aménagements hydroélectriques, d'autres aspects de la dévalaison des smolts (devenir des poissons entre les aménagements, comportement fin dans les retenues, ...) n'ayant pas été investigués.

Acquisition des connaissances annexes

En préambule, il est important de rappeler que les taux de progression des smolts présentés dans la partie 4.2 ne correspondent pas à la réussite ou l'échec de migration sur le tronçon étudié. Le suivi des déplacements des poissons a été uniquement possible au cours de la première semaine qui a suivi leurs lâchers à cause de la faible durée de vie des marques radio utilisées. Davantage de déplacements ont pu se produire après ce délai sans qu'ils aient été détectés.

Cette étude s'est déroulée durant deux années très contrastées d'un point de vue hydrologique en période de dévalaison des smolts : une hydrologie faible à moyenne en 2017 permettant aux usines de turbiner au maximum de leurs capacités ou presque et avec de rares déversement aux barrages, et une forte hydrologie en 2018 permettant également aux usines de turbiner au maximum de leurs capacités mais avec des déversements très fréquents, voire permanents aux barrages. Bien que l'étude ne se soit pas focalisée sur cet aspect, ces deux années contrastées ont clairement mis en évidence l'influence de l'hydrologie sur la migration des smolts de saumon atlantique. **L'hydrologie plus soutenue de 2018 par rapport à 2017 a motivé davantage d'individus relâchés à migrer pendant la première semaine après leur lâcher, leurs vitesses de migration ont été bien plus rapides et leur taux d'entraînement dans les prises d'eau ont été plus faibles** (Figure 11), comme observé par Havn et al. (2018) notamment. Ces observations peuvent être liées aux déversements aux barrages, qui ouvrent ainsi une voie supplémentaire pour la migration,

et/ou au fait que les smolts ont été plus stimulés par le fort débit en 2018 pour migrer en plus grand nombre et plus vite, et/ou simplement parce que les poissons ont été déplacés plus vite vers l'aval avec le courant plus rapide (Thorstad et al., 2012).

Critères d'efficacité pour un dispositif de dévalaison

Un dispositif de dévalaison efficace doit : 1/ empêcher les poissons de rentrer dans les turbines, 2/ les guider vers les exutoires de dévalaison et 3/ les transférer vers le cours d'eau à l'aval de l'aménagement hydroélectrique, tout ceci en minimum de temps et sans dommage pour les poissons. Comme dans Tomanova et al. (2018b), pour pouvoir confirmer la bonne conception d'un dispositif de dévalaison, il est attendu d'obtenir de très hautes performances, avec une faible variabilité entre les différents sites testés et dans différentes conditions environnementales. De plus, sans identifier à partir de quelle valeur le retard de franchissement deviendrait préjudiciable au succès de la migration des smolts, il a été défini la condition suivante pour valider l'efficacité du dispositif : une grande majorité des poissons (plus de 75 % d'individus) doit passer par le dispositif sans hésitation, c'est-à-dire au cours des 5 premières minutes depuis la première présentation du poisson devant le dispositif.

Efficacité des 3 sites à plans de grille inclinés

Sur les 3 sites équipés de plans de grille inclinés (Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot), la proportion des smolts guidés avec succès vers les exutoires et les empruntant pour continuer leur migration est importante. **Les efficacités globales (E_f) varient entre 86% et 96%** selon le site et ne sont jamais inférieures à 70 % quel que soit le lot de poissons (Tableau 5 -Tableau 7). En incluant les poissons passés par le barrage, **les taux de franchissement (Fr) par les voies considérées sans dommage** pour les poissons atteignent **entre 90 % et 98 %**. Les plus fortes valeurs d' E_f et Fr obtenues à Guilhot par rapport à Las Rives et Las Mijeannes s'expliquent par un débit d'équipement moindre de cet aménagement, ayant conduit lors les périodes des hautes eaux 1) à des exutoires de dévalaison plus alimentés en débit (conditions favorables à E_f , Figure 15), et 2) à davantage de déversements favorables au barrage, se traduisant par plus de passages de smolts par le barrage (favorable à Fr). En tenant compte de taux de mortalité dans les turbines de l'ordre de 13 % à Las Rives, 9 % à Las Mijeannes et 20 % à Guilhot (selon Bosc & Larinier, 2000 et en intégrant l'ajout du G4 à Las Rives), globalement pour 2017 et 2018, les taux de survie des smolts atteignent de l'ordre de 98.7 % à Las Rives, 99.1 % à Las Mijeannes et 99.6% à Guilhot.

L'analyse des temps de passage par les exutoires de dévalaison T_{EXU} (Tableau 10) montre que la grande majorité des smolts (entre 78 % et 90 % selon les sites) passent en moins de 5 minutes, indiquant que **le passage par les dispositifs eux-mêmes ne génère pas de retard de migration significatif**.

L'importance de la proportion de débit transitant par les exutoires de dévalaison par rapport au débit turbiné ($Q_{exu}\%$) sur l'efficacité de passage des poissons, a été déjà soulevée par d'autres études (Larinier & Boyer-Bernard, 1991; Larinier & Travade, 2002; Haraldstad et al., 2018; Klopries et al., 2018) sans tout de même identifier les valeurs-seuils qui garantissent le bon fonctionnement du dispositif de dévalaison. Nos résultats montrent également que **la proportion du débit transitant par les exutoires de dévalaison ($Q_{exu}\%$) joue un rôle important** (Figure 15). Pour la valeur de dimensionnement du débit d'alimentation des exutoires $Q_{exu}\%$, égale à 3% pour les 3 prises d'eau concernées, la probabilité de passer par les exutoires de dévalaison est d'environ 85 % et celle d'un passage sans hésitation est d'environ 80 %. Vers les valeurs de $Q_{exu}\%$ inférieures, ces probabilités diminuent rapidement avec un intervalle de confiance qui s'élargit. Vers les valeurs de $Q_{exu}\%$ supérieures, ces probabilités augmentent rapidement jusqu'à un $Q_{exu}\%$ de 5 %, puis de manière moins prononcée au-delà. Il ressort de ces analyses que la proportion du débit transitant par les exutoires de dévalaison issue des **règles de conception préconisées par Courret et al. (2015) constitue un bon rapport [débit alloué / efficacité]**. Il convient de **ne pas adopter de valeur de débit**

inférieure aux valeurs issues des règles de conception préconisées sous peine de dégrader sensiblement les performances des dispositifs. Inversement, **des valeurs de débit supérieures améliorent encore leurs performances.** **L'augmentation de ce débit est donc à considérer sur les sites où cela n'a aucun impact sur la production d'énergie,** e.g. dans les cas de disponibilité de débit dans le cadre de la restitution de tout ou partie d'un débit réservé ou de possibilité d'augmentation du débit avec l'élévation du niveau d'eau amont une fois les usines saturées. L'augmentation du débit de dévalaison devrait **également être envisagée lorsque les autres critères de dimensionnement ne peuvent pas être respectés** à cause des contraintes de réalisation sur les sites.

L'influence du débit transitant par les canaux d'amenée (Q_{ch}) n'a pas pu être appréciée dans le cadre de cette étude, les centrales ayant fonctionné à plein régime ou presque sur chacun des sites, durant les 2 années de suivi (peu de variabilité). On peut toutefois noter que les **conditions de turbinage testées** à plein régime **ont été a priori les plus pénalisantes vis-à-vis de l'efficacité** des dispositifs de dévalaison, avec notamment des valeurs maximales de vitesses normales au travers du plan de grille, et que cela n'a **pas empêché l'obtention de bonnes efficacités.**

Certains résultats pourraient à première vue suggérer que le débit de la rivière (Q_{riv}) influence directement l'efficacité des dispositifs (E_f en général plus important en 2018, Tableau 5 - Tableau 8) et le temps de passage des poissons (T_{EXU} à Pébernat plus court en 2018, Tableau 10). Toutefois, le débit de la rivière n'a pas été inclus dans les régressions logistiques parce qu'il est fortement lié au $Q_{exu}\%$. L'influence du débit de la rivière s'exprime en fait par l'augmentation du niveau d'eau dans la prise d'eau lors des épisodes de déversement aux barrages, ce qui a pour conséquence une augmentation du débit dans le dispositif de dévalaison ($Q_{exu}\%$).

La probabilité de passage par l'exutoire sans hésitation (temps de passage inférieur ou égal à 5 minutes) **est plus importante à Las Rives,** qu'à Las Mijeannes et Guilhot (Tableau 10 et Figure 15). Pour rappel, Las Rives, le dernier site construit, a intégré les recommandations les plus récentes avec deux différences majeures par rapport à Las Mijeannes et Guilhot :

- le sommet de la grille inclinée est obturé sur la même profondeur que les exutoires, de façon à obtenir des courants transversaux guidant les poissons sur la largeur de la prise d'eau vers les exutoires (Figure 20).
- les exutoires de Las Rives sont moins profonds (0.50 m contre 0.70 m et 0.65 m à Las Mijeannes et Guilhot), mais plus larges (1 m contre 0.72 m et 0.57 m). Leur largeur cumulée représente 20 % de la largeur de la prise d'eau (contre 10 % à Las Mijeannes et 11,4 % à Guilhot).

Ces différences de conception des exutoires entre les sites expliquent probablement le fait que les poissons aient trouvé et emprunté les exutoires de dévalaison plus rapidement à Las Rives.

Sur Las Rives et Las Mijeannes, les poissons passant au travers de la grille semblent légèrement plus petits par rapport aux poissons passant par le dispositif de dévalaison, mais cette différence n'est pas significative (Figure 14 ; pas de comparaison possible pour Guilhot). Cela rejoint les observations faites sur les 3 sites équipés de plans de grille inclinés (Tomanova et al., 2018b). Cette influence légère, mais non significative de la taille se retrouve également dans les résultats de la régression logistique (Figure 15).

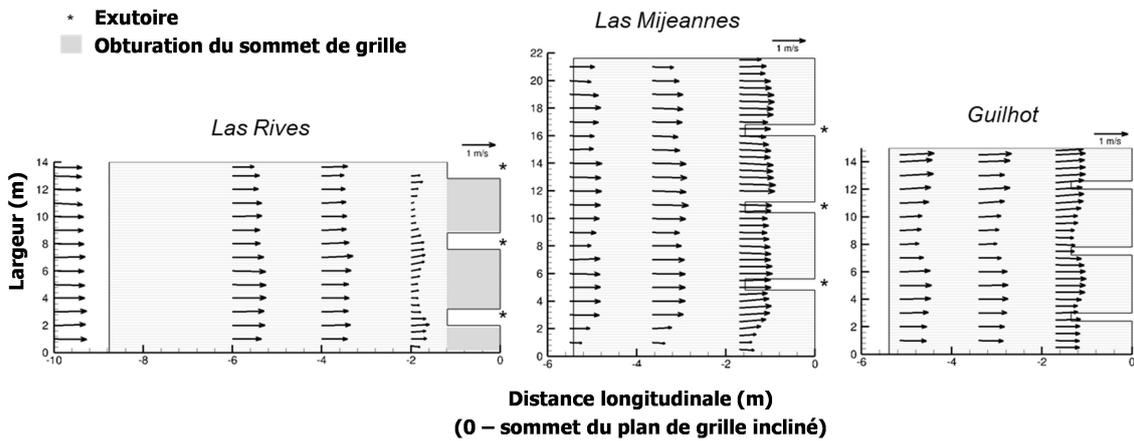


Figure 20 : courantologie au niveau des prises d'eau de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot, mesurée par Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) à différents transect en amont des plans de grille inclinés (Lemkecher et al., 2018; Dewitte et al., 2020).

Effacité du site à plan de grille orienté

Sur le site de Pébernat, équipé d'un plan de grille orienté, la proportion de smolts guidés avec succès vers l'exutoire ou la vanne-toit et les empruntant pour continuer leur migration est également importante (Tableau 8). L'efficacité globale (**Ef**) est de **89 %** et n'est jamais inférieure à 70 % quel que soit le lot de poissons. En incluant les poissons passés par le barrage, le **taux de franchissement (Fr)** par les voies considérées sans dommage pour les poissons **atteint 90 %**. En tenant compte du taux de mortalité dans les turbines de l'ordre de 20 % (selon Bosc & Larinier, 2000), globalement pour 2017 et 2018, le taux de survie des smolts est de l'ordre de 98 % à Pébernat.

Globalement, les temps de passage des smolts par l'exutoire ou la vanne-toit présentent une valeur médiane de 2 minutes et un 3^{ème} quartile de 17 minutes (Figure 12 et Figure 13). Environ 65 % des poissons passent en moins de 5 minutes. **Au regard de la configuration du site** et des antennes de détection (non comparables avec les 3 autres sites), ces **temps de passage** demeurent **satisfaisants**.

L'analyse de l'efficacité de l'exutoire de dévalaison seul, lorsque la vanne-toit ne déverse pas, indique une efficacité plus réduite, de l'ordre de 50 %, avec des temps de passage sensiblement plus élevés (Tableau 9). Ce résultat est toutefois à relativiser puisqu'il n'est obtenu que sur un effectif de 10 individus. Ce cas de figure (pas de déversement à la vanne-toit) se produit en moyenne environ 50 % du temps au cours de la principale période de dévalaison des smolts (du 1^{er} mars au 15 mai), la vanne-toit étant le premier ouvrage évacuant les débits. D'autre part, ce résultat peut s'expliquer (1) par la distance de l'ordre de 6 m entre le coin aval du plan de grille et l'exutoire de dévalaison créé dans la vanne secteur (distance impossible à réduire, la conception de l'exutoire de Pébernat a dû s'appuyer sur l'aménagement existant, en intégrant au mieux les préconisations) et (2) par une courantologie instable dans cette zone. En effet, nos observations durant l'étude ont permis de mettre en évidence (Figure 21) :

- un écoulement de surface parfois continu et dirigé vers l'exutoire, favorable à son attractivité,
- et parfois une zone d'ascendance au niveau du coin aval du plan de grille, avec un écoulement se redressant alors perpendiculairement à la grille et ne se dirigeant plus vers l'exutoire.

Ces différentes organisations de l'écoulement pourraient notamment être influencées par le débit turbiné, l'état de colmatage du plan de grille (parfois très important sur ce site) et/ou les hétérogénéités d'écoulement observées entre les 4 pertuis divisant la prise d'eau en aval du plan de

grille. Les investigations se poursuivent actuellement sur le fonctionnement de la prise d'eau et la caractérisation de sa courantologie par mesures ADCP et modélisations numériques, afin d'identifier d'éventuels leviers permettant de fiabiliser l'attractivité de cet exutoire.

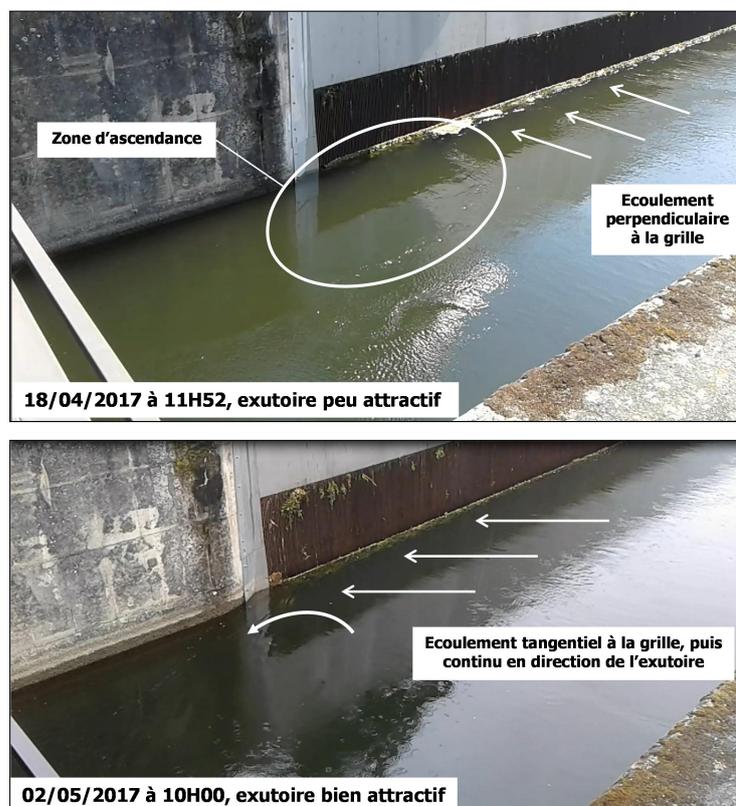


Figure 21 : observations de la courantologie de surface entre le coin aval du plan de grille et l'exutoire de Pébernat, en l'absence de déversement à la vanne-toit.

Sur le site de Pébernat, les poissons passés par l'exutoire ou la vanne toit sont significativement plus gros que ceux passés au travers de la grille (Figure 14). Cela rejoint les observations faites sur le site d'Halsou également équipé d'un plan de grille orienté (Tomanova et al., 2018b). Il semble ainsi que l'effet de la taille des poissons, s'exprime davantage dans la configuration de plans de grille orientés que dans la configuration de plans de grille inclinés.

Globalement...

Globalement, **les résultats** de cette étude sur 4 sites, en complément des 4 sites déjà évalués par Tomanova et al. (2018b), **valident les critères de la conception des prises d'eau ichtyocompatibles préconisés en France** (Courret & Larinier, 2008; Raynal et al., 2013b; Courret et al., 2015) **et confirment l'intérêt des dispositifs testés pour rétablir la dévalaison des smolts de saumon atlantique dans de bonnes conditions.** Avec les retours d'expériences acquis à l'étranger sur des configurations conformes ou proches de ces critères – les prises d'eau de Wadhams sur la rivière Boquet (Nettles & Gloss, 1987), de Pine Valley sur la rivière Souhegan (Charles Ritzi Associates, 1993) et de Lower Saranac sur la rivière Saranac (Simmons, 2000) aux USA et la prise d'eau d'Herting sur la rivière Atran en Suède (Nyqvist et al., 2018) – **cela fait un total de 12 configurations de prises d'eau ichtyocompatibles avec des débits entre 4 et 50 m³.s⁻¹, montrant des efficacités pour les smolts entre 80 % et 100 %** (6 plans de grille inclinés et 6 plans de grilles orientés). L'ensemble de ces retours d'expérience permettent aujourd'hui d'être confiant sur l'efficacité des prises d'eau

ichtyocompatibles préconisées en France, quel que soient les conditions environnementales et le débit maximum turbiné jusqu'à $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ environ.

Bien que les tests aient été effectués sur les juvéniles de saumon, il semble très probable que les bonnes performances de ces dispositifs soient également valables pour les saumons adultes redévalant vers la mer après la reproduction (saumons dit « ravalés » ou « kelts » en anglais). Cet aspect a été déjà prouvé sur l'aménagement Herting (rivière Ätran) en Suède où l'installation d'une grille orientée à faible espacement entre barreaux (15 mm) a été bénéfique non seulement pour les juvéniles de saumon (Ef entre 70 % et 95 %, Nyqvist et al., 2018), mais aussi pour protéger les ravalés (Ef de 100 %, tous les poissons étant passés par l'exutoire lors de leur première incursion dans la prise d'eau, Nyqvist et al., 2017).

Privilégier les prises d'eau ichtyocompatibles aux adaptations inefficaces de l'existant

Le simple ajout d'exutoire de dévalaison à des plans de grilles conventionnels, assurant la protection des turbines, a été mis en œuvre historiquement et est parfois toujours préféré à l'installation d'une prise d'eau ichtyocompatible, pour des questions de faisabilité technico-économique. Cependant, les études de ces adaptations de grilles conventionnelles montrent des efficacités souvent faibles et très variables selon les configurations (entre 10-20 % et 85 %), avec des variabilités importantes selon les conditions environnementales (Larinier & Travade, 2002; Ovidio et al., 2017; Haraldstad et al., 2018; cf. synthèse d'études dans Tomanova et al., 2018b). A contrario, sur les 4 sites étudiés sur l'Ariège, **la mise en place des prises d'eau ichtyocompatibles a permis des gains considérables d'efficacité** pour les smolts, **allant de 25 % à 55 %, par rapport aux anciens exutoires de dévalaison** (Figure 19 et Tableau 11).

Efficacité garantie avec un débit alloué à la dévalaison réduit

Les critères de conception des exutoires actuellement préconisés (Raynal et al., 2013b; Courret et al., 2015) conduisent à allouer aux exutoires de dévalaison des débits allant de l'ordre de 5,5 % du débit maximum turbiné sur les petites prises d'eau ($< 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) à 2-3 % pour les prises d'eau de plus de $30\text{-}50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces valeurs se trouvent dans la fourchette basse de la gamme identifiée par Larinier et Travade (2002) qui recommandent un débit de dévalaison entre 2 % et 10 % du débit maximum turbiné et d'autant plus important que les autres paramètres (pouvoir répulsif du plan de grille, guidage des poissons par la courantologie, localisation des exutoires, ...) sont défavorables à la dévalaison. Cela a encore été confirmé récemment par les résultats d'Haraldstad et al. (2018) au niveau de 2 prises d'eau en Norvège équipées d'exutoires associés aux plans de grille conventionnels (plans de grille avec 50 et 80 mm d'espacement). Des efficacités de l'ordre de 30 %-40 % pour les smolts y ont été obtenues avec les débits turbinés maxima et des débits d'exutoire de l'ordre 2-3 %. Les efficacités augmentent au fur et à mesure que les débits turbinés diminuent et que les proportions de débit dans les exutoires augmentent concomitamment, jusqu'à atteindre environ 90 % pour des débits turbinés réduits à 30 % du maximum et des débits d'exutoires de 7 %. En comparaison, les **prises d'eau ichtyocompatibles** présentent **l'avantage de garantir des efficacités élevées** et stables **en mobilisant des débits de dévalaison moindres**, limitant ainsi la part de débit non turbinée. De plus, dans le cas de centrales installées en dérivation du cours d'eau, si les prises d'eau ichtyocompatible sont installées en tête du canal d'amenée, comme c'est le cas à Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot, le **débit alloué à la dévalaison peut être inclus dans le débit réservé** à restituer dans le tronçon court-circuité. Il faut toutefois avoir conscience que cela empêche alors la mise en place d'un dispositif de montaison au niveau de la centrale qui déboucherait dans le canal d'amenée.

L'importance de l'installation optimisée et bien entretenue

La perte de charge plus importante sur la grille peut pénaliser non seulement l'efficacité du dispositif de dévalaison (Figure 18) mais également la production d'énergie (Hribernik, 2020). Pour une bonne conciliation avec l'exploitation hydroélectrique, pour éviter ou limiter au maximum son dysfonctionnement, il s'avère indispensable d'apporter une **attention particulière à la conception** :

- du **plan de grille** (1) en réduisant autant que possible son degré d'obstruction (épaisseur des barreaux) dans la limite des contraintes de tenue mécanique et (2) en adoptant des profils de barreaux et de supports profilés (Raynal et al., 2013a, 2013c; Lemkecher et al., 2020).
- et du **système de dégrillage**, en privilégiant autant que possible des organes dégrilleurs qui couvrent toute la largeur de la prise d'eau et qui sont équipés de dents rentrant dans les espaces inter-barreaux, et à défaut en veillant à ce que le temps du cycle complet de dégrillage soit suffisamment court (<10-30 minutes selon les prises d'eau).

Dans le cas des plans de grille orientés, une attention supplémentaire est à porter sur le mode d'assemblage des barreaux (conventionnels, alignés dans le sens de l'écoulement, horizontaux) vis-à-vis de l'homogénéité des champs de vitesses en amont et en aval et des pertes de charge (Lemkecher et al., (n.d.); Raynal et al., 2013a, 2014).

Vigilance tout de même !

Malgré les bonnes efficacités atteintes, les **impacts résiduels** sur les smolts ne sont toutefois **pas totalement nuls** (0.4% à 2% de mortalité globale par site). En conséquence, le cumul des **impacts** unitaires des aménagements hydroélectriques sur les axes très fortement équipés peut conduire à observer des taux de mortalités **cumulés significatifs**, et ce malgré la mise en place de prises d'eau ichtyocompatibles respectant les règles de l'art au niveau de chaque site.

Perspective de l'étude

Les performances des **prises d'eau ichtyocompatibles** apparaissent très satisfaisantes, stables entre les sites et entre différents lots testés. Ces dispositifs pourraient être **également bénéfiques** aux autres espèces migratrices, p.ex. **anguille argentée**, pour laquelle la problématique de l'entraînement dans les prises se pose avec acuité du fait des tailles importantes des individus pouvant engendrer des taux de mortalité élevés dans les turbines (Gomes & Larinier, 2008). **Une étude** similaire à celle-ci **doit être conduite** afin d'évaluer également l'efficacité de ces dispositifs de dévalaison pour protéger cette espèce.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Baras, E., & B. Cherry, 1990. Seasonal activities of female barbel *Barbus barbus* (L.) in the River Ourthe (Southern Belgium), as revealed by radio tracking. *Aquatic Living Resources* 3: 283–294.
- Baras, E., & J. P. Lagardere, 1995. Fish telemetry in aquaculture : review and perspectives. *Aquaculture International* 3: 77–102.
- Bosc, S., & M. Larinier, 2000. Définition d'une stratégie de reouverture de la Garonne et de l'Ariège à la dévalaison des salmonidés grands migrateurs. Rapport GHAAPPE RA.00.01/MIGADO G17-00-RT G: 127.
- Bosc, S., A. Nars, & O. Menchi, 2016. Contrôle de la migration des smolts de saumon atlantique en dévalaison au niveau des dispositifs de piégeage et de transport de Camon et de Pointis sur la Garonne. Campagne 2015. Rapport MIGADO. : 61.
- Bosc, S., A. Nars, O. Menchi, & E. Robert, 2013. Contrôle de la migration des smolts de saumon atlantique en dévalaison au niveau des dispositifs de piégeage et de transport de Camon et de Pointis sur la Garonne. MIGADO: 59.
- Calles, O., S. Karlsson, P. Veza, C. Comoglio, & J. Tielman, 2013. Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant. *Freshwater Biology* 58: 2168–2179.
- Chanseau, M., & M. Larinier, 1999. Etude du comportement du saumon atlantique (*Salmo salar* L.) au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Baigts (Gave de Pau) lors de sa migration anadrome. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 353–354: 239–262.
- Charles Ritzi Associates, 1993. Report of Results of a Study of the Effectiveness of Downstream Fish Passage Facilities at the Pine Valley Hydroelectric Project (FERC No. 9282) Souhegan River, New Hampshire. : 70.
- Courret, D., & M. Larinier, 2008. Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. Report GHAAPPE RA.08.04.: 60, http://oai.afbiodiversite.fr/cindocoai/download/PUBLI/152/1/2008_027.pdf_2258Ko.
- Courret, D., M. Larinier, L. David, & L. Chatellier, 2015. Development of criteria for the design and dimensioning of fish-friendly intakes for small hydropower plant. International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage, Groningen, available on http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1942&context=fishpassage_conference.
- Croze, O., 2008. Assessment of downstream fish bypasses for Atlantic salmon smolts at four hydroelectric facilities on the Ariège River (France). *American Fisheries Society Symposium*. : 123–140, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.577.8349&rep=rep1&type=pdf>.
- Dewitte, M., F. Lemkecher, D. Courret, L. Chatellier, & L. David, 2020. Caractérisation de la courantologie des prises d'eau ichtyocompatibles au niveau des centrales hydroélectriques de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot. Report AFB-IMFT-P' : 94.
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. G. Marquéz, B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitão, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reineking, B. Schröder, A. K. Skidmore, D. Zurell, & S. Lautenbach, 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36: 27–46.
- ECOGEA, 2017. Evaluation de l'efficacité du dispositif de dévalaison au niveau de l'aménagement hydroélectrique EDF de Tuilières (Dordogne) pour les smolts de saumon atlantique. Résultats des tests du printemps 2017. : 42.
- Gomes, P., & M. Larinier, 2008. Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan. Etablissement de formules prédictives. ONEMA Rapport GHAAPPE RA08.05: 76.

- Haraldstad, T., E. Höglund, F. Kroglund, T. O. Haugen, & T. Forseth, 2018. Common mechanisms for guidance efficiency of descending Atlantic salmon smolts in small and large hydroelectric power plants: Guidance efficiency of descending smolts at hydroelectric power plants. *River Research and Applications* 34: 1179–1185.
- Havn, T. B., E. B. Thorstad, M. A. K. Teichert, S. A. Sæther, L. Heermann, R. D. Hedger, M. Tambets, O. H. Diserud, J. Borcharding, & F. Økland, 2018. Hydropower-related mortality and behaviour of Atlantic salmon smolts in the River Sieg, a German tributary to the Rhine. *Hydrobiologia* 805: 273–290.
- Heiß, M., 2015. Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. *Ludwig - Maximilians - Universität München*: 61.
- Hribernik, A., 2020. Evaluation of Clogged Hydropower Plant Trash Rack Losses. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 142–152.
- Klopries, E.-M., Z. D. Deng, T. U. Lachmann, H. Schüttrumpf, & B. A. Trumbo, 2018. Surface bypass as a means of protecting downstream-migrating fish: lack of standardised evaluation criteria complicates evaluation of efficacy. *Marine and Freshwater Research* 69: 1882.
- Larinier, M., & S. Boyer-Bernard, 1991. Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 72–92.
- Larinier, M., & F. Travade, 1999a. The development and evaluation of downstream bypasses for juvenile salmonids at small hydroelectric plants in France *Innovations in Fish Passage Technology*. *Odeh M*: 25–42.
- Larinier, M., & F. Travade, 1999b. La dévalaison des migrateurs : problèmes et dispositifs. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 353–354: 181–210.
- Larinier, M., & F. Travade, 2002. Downstream migration: problems and facilities. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 364: 181–207.
- Lauters, F., & G. Segura, 1998. Exutoire de dévalaison de Pébernat - contrôle d'efficacité - année 1998. : 51.
- Le Coz, J., B. Camenen, G. Dramais, J. Ribot-Bruno, M. Ferry, & J.-L. Rosique, 2011. Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L.214-18 du code de l'environnement. *Collection Guides techniques de la police de l'eau*. : 132.
- Lemkecher, F., L. Chatellier, D. Courret, & L. David, 2020. Contribution of Different Elements of Inclined Trash Racks to Head Losses Modeling. *Water* 12: 966.
- Lemkecher, F., L. Chatellier, D. Courret, & L. David, (n.d.). Experimental study of fish-friendly angled trash racks with horizontal bars. accepted in *Journal of Hydraulic Research* .
- Lemkecher, F., L. David, D. Courret, & L. Chatellier, 2018. Field measurements of the attractivity of bypasses for fishfriendly trashrack. *E3S Web of Conferences* 40: 03039.
- Nettles, D. C., & S. P. Gloss, 1987. Migration of Landlocked Atlantic Salmon Smolts and Effectiveness of a Fish Bypass Structure at a Small-Scale Hydroelectric Facility. *North American Journal of Fisheries Management* 7: 562–568.
- Nyqvist, D., J. Elghagen, M. Heiss, & O. Calles, 2018. An angled rack with a bypass and a nature-like fishway pass Atlantic salmon smolts downstream at a hydropower dam. *Marine and Freshwater Research* 69: 1894.
- Nyqvist, D., L. A. Greenberg, E. Goerig, O. Calles, E. Bergman, W. R. Ardren, & T. Castro-Santos, 2016. Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. *Ecol Freshw Fish* 26: 707–718.

- Nyqvist, D., P. A. Nilsson, I. Alenäs, J. Elghagen, M. Hebrand, S. Karlsson, S. Kläppe, & O. Calles, 2017. Upstream and downstream passage of migrating adult Atlantic salmon: Remedial measures improve passage performance at a hydropower dam. *Ecological Engineering* 102: 331–343.
- Ovidio, M., A. Dierckx, S. Bunel, L. Grandry, C. Spronck, & J. P. Benitez, 2017. Poor Performance of a Retrofitted Downstream Bypass Revealed by the Analysis of Approaching Behaviour in Combination with a Trapping System. *River Research and Applications* 33: 27–36.
- Peake, S., R. S. McKinley, D. A. Scruton, & R. Moccia, 1997. PEAKE S., MCKINLEY R.S., SCRUTON D.A. and MOCCIA R., 1997. Influence of transmitter attachment procedures on swimming performance of wild and hatchery-reared Atlantic salmon smolts. , 126, 707-714. *Trans. Am. Fish. Soc.* 126: 707–714.
- Raynal, S., L. Chatellier, D. Courret, M. Larinier, & L. David, 2013a. An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 2. Angled trashracks. *Journal of Hydraulic Research* 51: 67–75.
- Raynal, S., L. Chatellier, D. Courret, M. Larinier, & L. David, 2014. Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks. *Journal of Hydraulic Research* 52: 426–431.
- Raynal, S., L. Chatellier, L. David, D. Courret, & M. Larinier, 2012. Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Pertes de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles et champs de vitesse à leur approche. *Rapport Pole RA11.02.* : 114.
- Raynal, S., L. Chatellier, L. David, D. Courret, & M. Larinier, 2013b. Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Etude de l'alimentation en débit et du positionnement des exutoires de dévalaison au niveau de plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles. *Rapport Pole RA12.02.* : 123.
- Raynal, S., D. Courret, L. Chatellier, M. Larinier, & L. David, 2013c. An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 1. Inclined trashracks. *Journal of Hydraulic Research* 51: 56–66.
- Simmons, R. A., 2000. Effectiveness of a fish bypass with an angled bar rack at passing atlantic salmon and steel head trout smolts at the lower Saranac hydroelectric project *Advances in fish passage technology: engineering design and biological evaluation.* Odeh M.: 95–102.
- Thorstad, E. B., F. Whoriskey, I. Uglem, A. Moore, A. H. Rikardsen, & B. Finstad, 2012. A critical life stage of the Atlantic salmon *Salmo salar*: behaviour and survival during the smolt and initial post-smolt migration. *Journal of Fish Biology* 81: 500–542.
- Tomanova, S., D. Courret, & A. Alric, 2017. Protecting fish from entering turbines: the efficiency of a low-sloping rack for downstream migration of Atlantic salmon smolts. *La Houille Blanche* 11–13.
- Tomanova, S., D. Courret, A. Alric, E. De Oliveira, T. Lagarrigue, & S. Tétard, 2018a. Etude d'efficacité des exutoires associés à des grilles inclinées ou orientées pour la dévalaison des smolts de saumon atlantique : étude 2016 et synthèse des résultats 2015-2016. : 49.
- Tomanova, S., D. Courret, A. Alric, E. De Oliveira, T. Lagarrigue, & S. Tétard, 2018b. Protecting efficiently sea-migrating salmon smolts from entering hydropower plant turbines with inclined or oriented low bar spacing racks. *Ecological Engineering* 122: 143–152.
- Travade, F., & M. Larinier, 2006. French experience with downstream migration devices *International DWA Symposium on Water Resources Management.* Berlin: 91–99.
- Winter, J. D., 1983. Underwater biotelemetry. *Fisheries techniques.* American Fisheries Society 371–395.

7. ANNEXES

7.1 Principe de la radiotélémetrie

Dans son principe général, la radiotélémetrie consiste à équiper un animal d'un émetteur radio et à suivre ses déplacements dans son milieu à l'aide de récepteurs, fixes ou mobiles, reliés à une antenne (Figure 22).

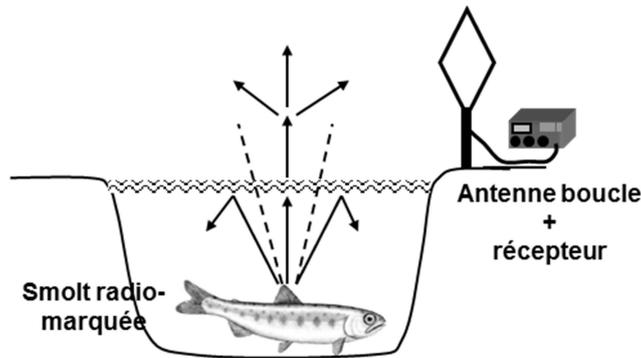


Figure 22 : principe du radiopistage en milieu aquatique (d'après Baras & Cherry, 1990).

Le plus souvent, les limites de la télémetrie sont fixées par la technologie utilisée, c'est à dire la puissance et la portée des émetteurs ou encore leur durée de vie. Par ailleurs, le signal transmis par l'émetteur s'atténue plus rapidement dans l'eau que dans l'air et ce, d'autant plus qu'on est en profondeur, que la conductivité électrique de l'eau augmente et que la fréquence d'émission est élevée (Winter, 1983). Un ensemble de précaution doit être pris pour que les émetteurs n'interfèrent significativement pas avec la survie, les performances ou le comportement des poissons (Baras & Lagardere, 1995).

Pour atteindre les objectifs de cette étude, il a été nécessaire d'identifier chaque poisson, de pouvoir le suivre à distance, de connaître ses voies de franchissement (où et quand) et ses déplacements entre ouvrages hydroélectriques. La radiotélémetrie répond à ce besoin. Le protocole utilisé lors des 2 années d'étude a consisté à lâcher en amont des aménagements des lots de smolts porteurs d'un émetteur individuel. Le suivi de leurs déplacements s'est principalement basé sur des postes récepteur-enregistreurs automatiques, positionnés de manière fixe au niveau de chaque site d'étude, et a été complété par des repérages manuels sur tout le tronçon. Ceci a permis d'étudier le comportement des poissons à l'approche des aménagements étudiés, et de déterminer la voie de passage empruntée lors du franchissement de l'ouvrage (exutoires, turbines, seuil/barrage/vanne...).

7.2 Présentation détaillée des sites de suivi

7.2.1 Las Rives

L'aménagement de Las Rives est composé d'un seuil d'environ 220 m de long et de 4,3 m de haut qui dérive l'eau de l'Ariège vers une centrale par un canal d'aménée long de 165 m. Le tronçon court-circuité ainsi créé mesure 530 m. La centrale historique est composée de 3 turbines Francis de $12,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ chacune, soit $37,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ d'équipement. En 2015, une turbine de type Dive (8) a été installée un peu en amont de la centrale historique. En 2017, une seconde turbine Dive ($3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a été installée en rive droite, à l'extrémité amont du seuil et à proximité de la passe à poissons pour turbiner une partie du débit réservé. L'équipement total de la prise d'eau étudiée est donc de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et l'équipement total du site est de $48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La prise d'eau principale mesure 14 m de large et 4.18 m de profondeur.

Le sommet du plan de grille est obturé sur la même profondeur que les exutoires pour générer des courants transversaux.

Le plan de grille est équipé de deux dégrilleur fixes à crémaillère (Photo 1), évacuant les dégrillats dans la même goulotte que celle pour les poissons dévalant (goulotte commune).

7.2.2 Las Mijeannes

L'aménagement de Las Mijeannes est composé d'un seuil d'environ 130 m et de 1,65 à 2,25 m de haut qui dérive l'eau de l'Ariège vers une centrale par un canal d'aménée long de 540 m. Le tronçon court-circuité ainsi créé mesure 1350 m. La centrale est composée de 4 turbines Kaplan de $11,25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ chacune, soit un équipement total de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'eau turbinée par la centrale rejoint l'Ariège 300 m en aval de la centrale.

La prise d'eau mesure 21,6 m de large et 2.58 m de profondeur.

Le sommet du plan de grille n'est pas obturé.

Le plan de grille est équipé d'un dégrilleur mobile à bras articulé évacuant les dégrillats dans la même goulotte que celle pour les poissons dévalant (goulotte commune).

7.2.3 Guilhot

L'aménagement de Guilhot est composé d'un seuil d'environ 130 m de long et de 2,2 m de haut qui dérive l'eau de l'Ariège vers une centrale par un canal d'aménée long de 1160 m. Le tronçon court-circuité ainsi créé mesure 1920 m. La centrale est équipée de 3 turbines Kaplan de $11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ chacune, soit un équipement total de $33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'eau turbinée par la centrale rejoint l'Ariège 300 m en aval de la centrale.

La prise d'eau mesure 15 m de large et 2.65 m de profondeur.

Le sommet du plan de grille n'est pas obturé.

A la différence des centrales de Las Rives et Las Mijeannes, il n'y a pas de goulotte de transfert, les poissons rejoignent le cours d'eau directement après le passage par le seuil de contrôle du débit. Le plan de grille est équipé d'un dégrilleur mobile à bras articulé, évacuant les dégrillats dans la même goulotte que celle pour les poissons dévalant (goulotte commune).

7.2.4 Pébernat

L'aménagement de Pébernat est composé d'un barrage de 85 m composé d'un mur déversant d'environ 45 m et de 2 clapets de régulation de 15 m chacun. La hauteur de ce barrage est de 2,5 m. La passe à poissons et les clapets du barrage permettent d'alimenter le tronçon court-circuité avec un débit réservé de $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le tronçon court-circuité de Pébernat est d'une longueur d'environ 7 km.

L'usine est alimentée à partir d'un canal d'amenée d'une longueur de 4700 m. La centrale est équipée de 2 groupes Kaplan capables de turbiner $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ chacun sous 20 m de chute. L'équipement total de la centrale est donc de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La prise d'eau se présente sous la forme d'un chenal d'environ 100 m de long, 27 m de large et 2.5 m de profondeur.

A l'aval du plan de grille, le début du canal d'amenée est divisé en 4 pertuis menant à 4 vannes de régulation du débit entonné (distance entre le plan de grille et les vannes variant d'environ 15 m à 40 m selon les pertuis). A l'aval des vannes de régulation, le canal d'amenée est encore divisé en 2 pertuis sur une distance d'environ 45 m. Le plan de grille est équipé d'un dégrilleur mobile à bras télescopique, évacuant les dégrillats dans une goulotte dédiée.

En aval de la vanne secteur et de l'exutoire, un pré-barrage en Omniflots® a été construit afin de maintenir un niveau d'eau suffisant au niveau de la réception des poissons. Les poissons rejoignent ensuite le tronçon court-circuité de l'Ariège par le chenal de décharge.

7.3 Fonctionnement des usines pendant l'étude

7.3.1 Las Rives

En 2017, les débits de l'Ariège ont été centrés autour du module de la rivière et n'ont que très rarement dépassé le débit d'équipement de l'usine de Las Rives (peu de surverses au barrage). L'usine a donc fonctionné au maximum de ses capacités en fonction du débit disponible, avec seulement quelques courtes périodes de déversement (Figure 23). Lors de la période de suivi des smolts (11 avril au 28 mai 2017), aucun arrêt d'usine n'a été relevé.

En 2018, l'hydrologie de l'Ariège a été beaucoup plus abondante, atteignant quasiment 4 fois le module lors du coup d'eau du 8 mai 2018. L'hydrologie a été largement supérieure au débit d'équipement de l'usine de Las Rives, saturant ainsi celle-ci et provoquant des déversements au barrage plus ou moins importants pendant quasiment tout le suivi 2018 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Sur la période de données exploitables, uniquement 10h d'arrêt d'usine ont été enregistrées (le 08 mai de 5h à 15h).

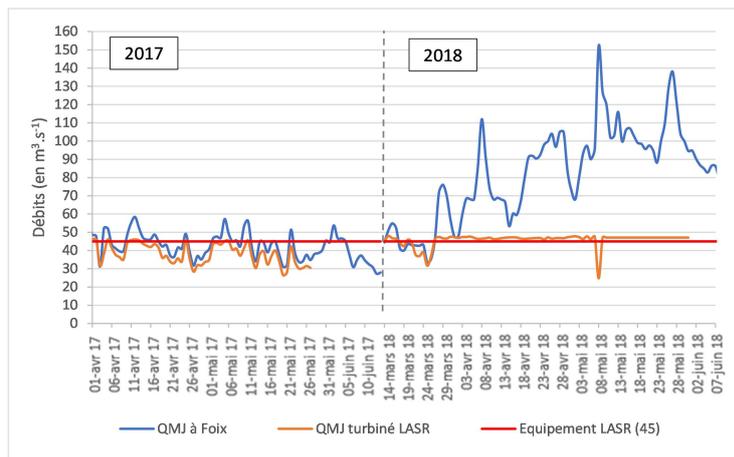


Figure 23 : débit moyen journalier turbiné à Las Rives et de l'Ariège à Foix au cours des suivis 2017 et 2018

7.3.2 Las Mijeannes

Le débit d'équipement de Las Mijeannes étant similaire à celui de Las Rives ($45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), en 2017 les conditions de fonctionnement de Las Mijeannes ont été sensiblement identiques à celles de Las Rives. L'usine a fonctionné au maximum de ses capacités en fonction du débit disponible, avec uniquement quelques courtes périodes de déversement (Figure 24). Lors de la période de suivi des smolts (11 avril au 28 mai 2017), aucun arrêt d'usine n'a été relevé.

En 2018, les conditions de fonctionnement de Las Mijeannes ont également été proches de celles de Las Rives (Figure 24) : l'usine a fonctionné jusqu'à saturation pendant l'ensemble de la période de suivi avec des surverses au barrage plus ou moins importantes. Lors de la crue du 8 mai, le fonctionnement de l'usine a été réduit de 5h à 18h. Le 9 mai, une brèche s'est ouverte dans le déversoir de sécurité situé dans le canal d'amenée en amont immédiat de l'usine et a entraîné son arrêt complet à 15h, jusqu'à la fin du suivi.

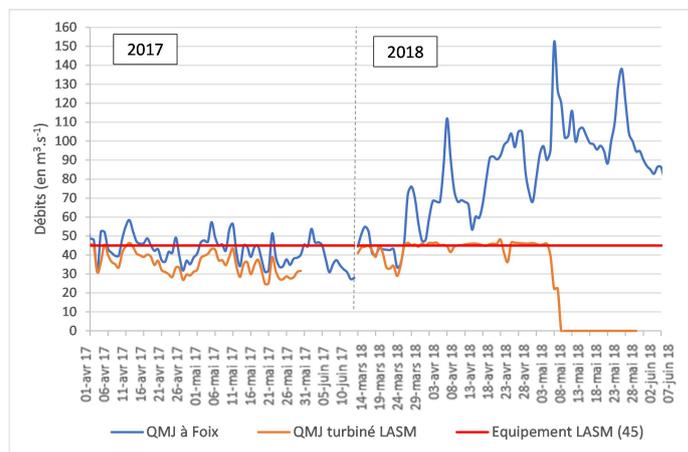


Figure 24 : débit moyen journalier turbiné à Las Mijeannes et de l'Ariège à Foix au cours des suivis 2017 et 2018

7.3.3 Guilhot

L'usine de Guilhot a le débit d'équipement le plus faible des 4 ouvrages étudiés. L'usine a fonctionné à pleine capacité tout au long des suivis 2017 et 2018, soit environ $33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de débit turbiné (Figure 25). Des déversements réguliers ont été observés au barrage en 2017 et en 2018, les déversements étant continus et de plus grande ampleur en 2018 qu'en 2017 (Figure 25).

En 2017, seules 5 h d'arrêt d'usine ont été recensées le jour du premier lâcher (11 avril), mais avant l'heure de lâcher. Lors du printemps 2018, une dizaine d'heures d'arrêt ont été enregistrées, mais en dehors des périodes de lâchers et de suivi des smolts marqués.

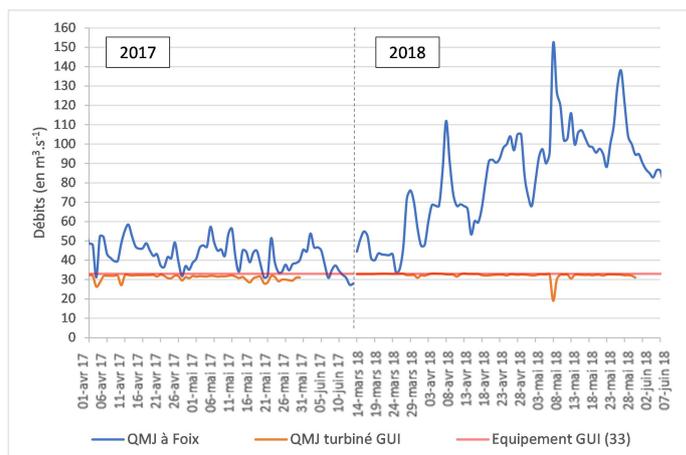


Figure 25 : débit moyen journalier turbiné à Guilhot et de l'Ariège à Foix au cours des suivis 2017 et 2018

7.3.4 Pébernat

Le débit d'équipement de Pébernat est théoriquement le plus important des 4 ouvrages suivis ($50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), même si dans les faits le débit turbiné n'a jamais dépassé $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en 2017 et 2018. Cette différence de 8% avec le débit d'équipement théorique est la conséquence des pertes de charge au niveau du plan de grille qui réduisent la capacité d'entonnement de la prise d'eau.

Lors du suivi 2017, l'usine de Pébernat a fonctionné au maximum de ses capacités en fonction du débit disponible quasiment en permanence (Figure 26). Quelques déversements (vanne toit ou barrage) ont tout de même été enregistrés et aucun arrêt d'usine n'est intervenu.

La forte hydrologie de 2018 a également permis à l'usine de fonctionner à pleine puissance quasiment tout au long du suivi. L'usine a subi un arrêt de 28 h entre le 8 et 9 mai 2018 en lien avec le pic de débit enregistré ($150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à Foix, soit 3 fois le module). Les périodes de surverses au niveau de l'ouvrage de Pébernat par la vanne toit et par le barrage ont été très fréquentes tout au long de ce second suivi.

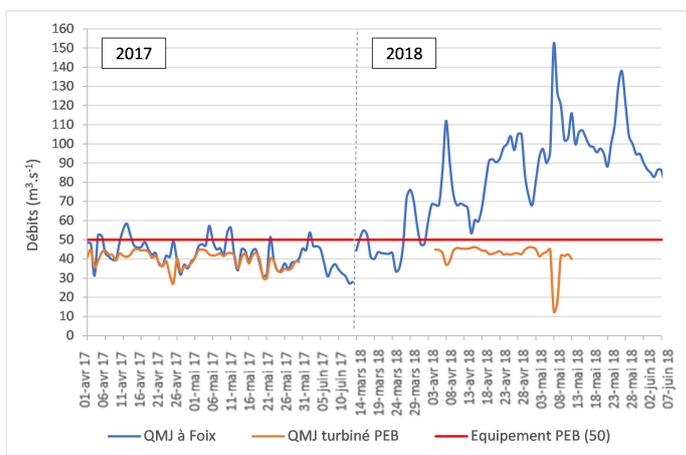


Figure 26 : débit moyen journalier turbiné à Pébernat et de l'Ariège à Foix au cours des suivis 2017 et 2018

Pour rappel, dans le prolongement aval du plan de grille, se trouve la vanne-toit fonctionnant de manière automatique via des flotteurs, pour réguler la cote amont de la retenue. Son ouverture est prioritaire sur l'ouverture des deux clapets du barrage. En fonction de l'hydrologie de l'Ariège, l'ouverture de cette vanne toit peut être très importante (évacuation maximale de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), créant ainsi une nouvelle voie d'échappement pour les poissons dévalant (Photo 24 et Photo 25).



Photo 24 : vue depuis l'aval du canal de décharge de Pébernat avec l'ouverture de l'exutoire de dévalaison à 2 m^3 (à gauche) et la vanne toit fermée (à droite) – 18/04/17



Photo 25 : vue depuis l'aval de la vanne toit ouverte lors d'un coup d'eau en 2018

L'information concernant l'ouverture ou la fermeture de cette vanne a été enregistrée par l'intermédiaire d'une sonde de niveau à ultrasons, mise en place à partir du 18 avril 2017. La Figure 27 représente graphiquement le fonctionnement de cette vanne.

L'hydrologie faible à modérée du printemps 2017 a entraîné des ouvertures épisodiques de la vanne-toit, allant de quelques heures à quelques jours. Sur les 577 heures de suivi en 2017, la vanne toit a été ouverte 211 heures, soit 38,3% du temps. A noter que la sonde a été installée après le lâcher du premier lot de poissons radio-marqués en 2017.

La forte hydrologie rencontrée au printemps 2018 a eu pour conséquence l'ouverture permanente de la vanne toit tout au long du suivi 2018.

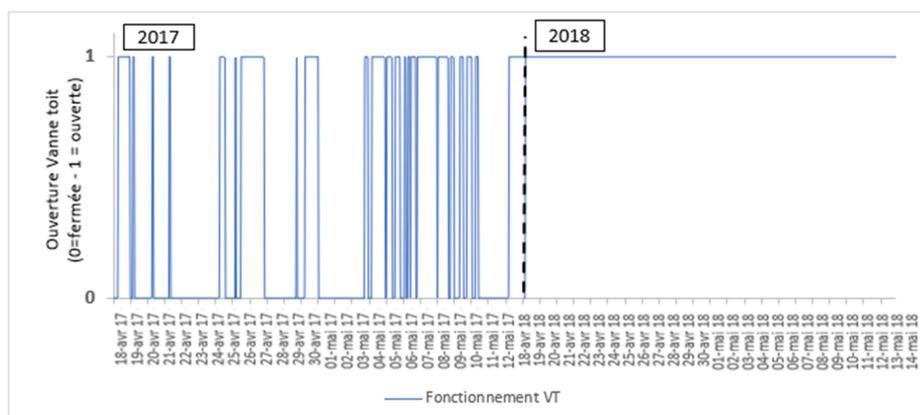


Figure 27 : fonctionnalité de la vanne toit (VT) de Pébernat au cours des suivis 2017 et 2018

7.4 Calculs des paramètres de fonctionnement des aménagements hydroélectriques de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot

Pour les sites de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot, sur l'intégralité des deux périodes de suivi des smolts (du 11 avril au 15 mai 2017 et de 19 avril au 18 mai 2018), la société Ondulia a fourni les données d'exploitation suivantes, à un pas de temps de 10 minutes :

- la puissance produite par chaque groupe (turbine),
- les cotes des niveaux d'eau :
 - des retenues, à l'amont immédiat des vannes de garde.
 - à l'amont immédiat de la prise d'eau (uniquement à LASR).
 - à l'aval immédiat de la prise d'eau (uniquement à LASR et LASM).
 - à l'amont immédiat des centrales.
 - à l'aval immédiat des centrales.

Les ouvertures des vannes de dégrèvement pouvant intervenir en crue ne sont en revanche pas bancarisées.

Partant de ces données, les paramètres suivants ont pu être calculés :

Débit turbiné

Les débits turbinés (Q_{turb}) ont été calculés grâce à la formule suivante :

$$Q_{turb} = \frac{\text{Puissance totale}}{9.81 * \text{rendement} * \text{chute}}$$

La puissance totale correspond à la somme des puissances de tous les groupes de la centrale. Le rendement global des installations a été fixé à 0.8 pour toutes les turbines, et la chute (en mètre) correspond à la différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval de la centrale. Les puissances indiquées en négatif ont été considérées comme nulles (groupe à l'arrêt).

Débit déversé à l'amont de l'usine par le seuil de sécurité

Chaque centrale est équipée à l'amont immédiat de l'usine d'un déversoir latéral de sécurité dont les côtes sont les suivantes :

- Las Rives : côte déversoir à 334.53 m NGF, longueur indéterminée, cependant la côte de déversement est bien au-dessus de la côte de retenue. Il ne déverse que très rarement et cela ne s'est pas produit durant le suivi.
- Las Mijeannes : côte déversoir à 316.36 m NGF, longueur d'environ 62 m.
- Guilhot : côte déversoir à 310.72 m NGF, longueur d'environ 23.5 m.

Le débit déversé par le seuil de sécurité Q_{dev} a été calculé grâce à une loi de seuil :

$$Q_{dev} = m * l * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

Avec :

m coefficient de débit du seuil, égal à 0.38

l la longueur du déversoir (m)

g l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s²)

H la charge sur le déversoir (m), différence entre le niveau d'eau à l'amont de la centrale et la cote du déversoir.

Débit transitant vers la centrale hydroélectrique

Le débit détourné vers la centrale hydroélectrique Q_{ch} a été calculé en sommant le débit total turbiné et le débit transitant par le déversoir de sécurité à l'usine.

$$Q_{ch} = Q_{dev} + Q_{turb}$$

Débit déversé par le seuil du barrage

Le débit déversé au barrage Q_{bar} a été calculé par l'application d'une loi de seuil :

$$Q_{bar} = m * l * \sqrt{2g} * H^{1.5}$$

Avec les caractéristiques des différents seuils qui sont les suivantes :

- Las Rives : crête à 333.91 m NGF, déversoir de 220 m
- Las Mijeannes : crête à 316.34 m NGF, déversoir de 200 m
- Guilhot : crête à 310.72 m NGF, déversoir de 125 m

Le coefficient de débit m a été pris égal à 0.38. La charge sur le seuil H est obtenue par différence entre la cote du niveau d'eau de la retenue et la cote du seuil.

Débit réservé

Pour chaque centrale, le débit réservé Q_{res} dans le tronçon court-circuité est constitué du débit de dévalaison, du débit alimentant la passe à poisson (considéré constant) et du débit passant par l'échancrure (considéré constant). Les débits réservés (hors débit de dévalaison) sont fixés comme suit :

- Las Rives : passe à bassins + groupe de restitution $G5 = 3.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Las Mijeannes : prébarrage + échancrure = $3.35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Guilhot : prébarrage + échancrure = $4.70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

Débit total transitant par les exutoires de dévalaison

Le débit total transitant par les exutoires de dévalaison Q_{exu} a été calculé grâce à une loi de seuil à partir des caractéristiques du seuil de contrôle située à l'extrémité de la goulotte collectrice. La formule suivante a été appliquée :

$$Q_{exu} = C_d * C_v * l * \sqrt{2g} * (H - PdCh)^{1.5}$$

Avec :

C_d coefficient de débit du seuil

C_v coefficient de correction liée aux fortes vitesses d'écoulement dans la goulotte collectrice à l'approche du seuil de contrôle

l largeur du seuil (m)

g accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

H la charge sur le seuil de contrôle (m), obtenue par différence entre le niveau d'eau de la retenue et la cote du seuil

$PdCh$ la perte de charge entre le niveau d'eau de la retenue et le niveau d'eau à l'amont immédiat du seuil de contrôle (m), liée à la goulotte collectrice et à l'accélération des écoulements.

Et les données suivantes :

- Las Rives : calculé à partir de la côte amont grille fine, en considérant une $PdCh = 9 \text{ cm}$ - Déversoir de 2.41 m à la côte 333.52 m NGF soit 39 cm en-dessous de la crête du seuil, $C_d = 0.46$, $C_v = 1.069$;
- Las Mijeannes : calculé à partir de la côte de la retenue, en considérant une $PdCh = 10 \text{ cm}$ - Déversoir de 2.41 m à la côte 315.83 m NGF soit 51 cm en-dessous de la crête du seuil, $C_d = 0.46$, $C_v = 1.123$;

- Guilhot : calculé à partir de la côte amont grille fine, en considérant une PdCh = 12 cm
- Déversoir de 1.88 m à la côte 310.34 m NGF soit 38 cm en-dessous de la crête du seuil, Cd = 0.48, Cv = 1.09.

Les coefficients de débit des seuils Cd et les coefficients de correction liée aux fortes vitesses d'écoulement Cv ont été évalués à partir du rapport entre la largeur des goulottes collectrices et la largeur des seuils de contrôle (égaux à 1) et du rapport entre la charge hydraulique sur les seuils et la profondeur totale en amont des seuils, en se référant au guide d'hydrométrie (Le Coz et al., 2011). La perte de charge entre le niveau d'eau de la retenue et le niveau d'eau à l'amont immédiat du seuil de contrôle a été évaluée à partir de mesures sur les sites.

Débit total de l'Ariège

Le débit total de l'Ariège Q_{riv} au niveau de chaque site a été calculé en faisant la somme de l'ensemble de ces débits :

$$Q_{riv} = Q_{pe} + Q_{exu} + Q_{res} + Q_{bar}$$

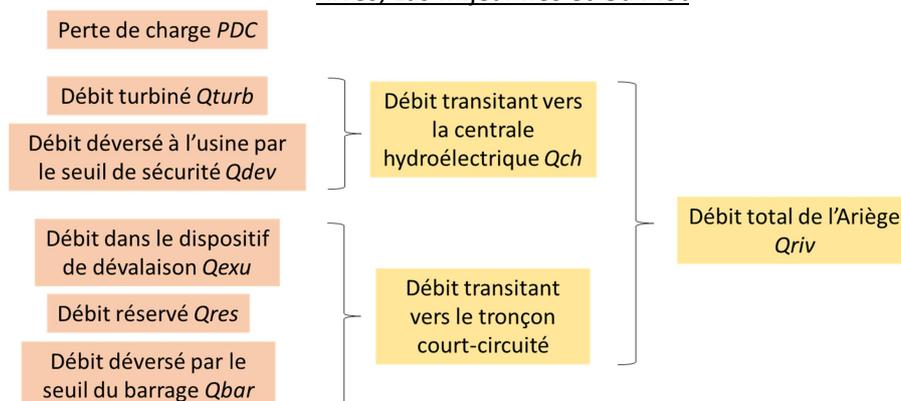
Perte de charge au niveau des prises d'eau

La perte de charge au niveau des prises d'eau PDC a été calculée par différence entre le niveau d'eau de la retenue et le niveau d'eau à l'aval de la prise d'eau, uniquement sur les sites de Las Rives et Las Mijeannes.

Hauteur d'eau déversante sur le seuil

La hauteur d'eau déversante sur le seuil H_{dev} a été calculée par différence entre le niveau d'eau de la retenue et la cote du seuil.

Récapitulatif des données de fonctionnement des prises d'eau disponibles pour les sites de Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot



7.5 Heure d'arrivée des poissons dans les prises d'eau au cours de l'étude

