



**HAL**  
open science

## Étude d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour l'anguille européenne

Laurence Tissot, Sylvie Tomanova, Dominique Courret, Sylvain Richard, Olivier Mercier, Manon Dewitte, Eric de Oliveira, Vincent Mataix, Aurélien Frey, Thierry Lagarrigue, et al.

### ► To cite this version:

Laurence Tissot, Sylvie Tomanova, Dominique Courret, Sylvain Richard, Olivier Mercier, et al.. Étude d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour l'anguille européenne : Projet EFFIGRI. EDF R&D; OFB; PPRIME; EDF CIH; ECOGEA; ICEO. 2022. hal-04194056

**HAL Id: hal-04194056**

**<https://ofb.hal.science/hal-04194056>**

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

EDF R&D

LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT

GESTION HYDRO-ENVIRONNEMENTALE DES OUVRAGES

6 quai Watier - 78401 CHATOU CEDEX - +33 (1) 30 87 79 46

17/02/2022

ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -

Laurence TISSOT	EDF R&D - LNHE
TOMANOVA Sylvie	OFB Pôle écohydraulique
COURRET Dominique	OFB Pôle écohydraulique
RICHARD Sylvain	OFB Pôle écohydraulique
LAGARRIGUE Thierry	ECOGEA
TETARD Stéphane	ICEO

6125-3313-2020-00368-FR	1.0		
Type d'information : Rapport externe			
<p>L'objectif principal de cette étude est d'évaluer, pour les anguilles en dévalaison au stade argenté, 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, associé à un ou plusieurs exutoire(s) de dévalaison -, afin d'en valider ou non les critères de conception.</p> <p>La liste complète des auteurs de ce rapport sont : Laurence TISSOT (EDF R&amp;D), Sylvie TOMANOVA (OFB pôle écohydraulique), Dominique COURRET (OFB pôle écohydraulique), Sylvain RICHARD (OFB pôle écohydraulique), Olivier MERCIER (OFB pôle écohydraulique), Manon DEWITTE (PPRIME), Eric DE OLIVEIRA (EDF R&amp;D), Vincent MATAIX (EDF CIH), Aurélien FREY (ECOGEA), Thierry LAGARRIGUE (ECOGEA), Stéphane TETARD (ICEO)</p>			

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

### Circuit de validation

<b>Auteur</b>	Laurence TISSOT	15/02/2022	
<b>Vérificateur</b>	Sylvie MERIGOUX-LHOPITAL	15/02/2022	
<b>Approbateur</b>	Jeremy BUTTIN	17/02/2022	

<b>Code affaire</b>	P123Z
---------------------	-------

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## Liste de diffusion

<b>Groupe destinataire</b>
3313-GHEO

Pré-diff	Diff	Destinataire	Structure	E-mail
	X	BARILLIER Agnès	EDF CIH	agnes.barillier@edf.fr
	X	BECHE Leah	EDF CIH	leah.beche@edf.fr
	X	BOUSQUET Marie-Charlotte	EDF Hydro Sud-Ouest	marie-charlotte.bousquet@edf.fr
	X	BUTTIN Jeremy	EDF R&D - LNHE	jeremy.buttin@edf.fr
	X	CARLOTTI Bruno	EDF R&D - FC	bruno.carlotti@edf.fr
X	X	COURRET Dominique	OFB Pôle écohydraulique	dominique.courret@imft.fr
	X	DE-OLIVEIRA Eric	EDF R&D - LNHE	eric.de-oliveira@edf.fr
	X	DESBORDES Marc	EDF Attaché bassin Loire-Bretagne	marc.desbordes@edf.fr
	X	DIDIOT Anne	EDF Hydro	anne.didiot@edf.fr
	X	DUBIEN Isabelle	EDF Hydro	isabelle.dubien@edf.fr
	X	DUMOND Lionel	EDF CIH	lionel.dumont@edf.fr
	X	FOUCHER Taïna	EDF Petite Hydro	taina.foucher@edf.fr
X	X	FREY Aurélien	ECOGEA	aurelien.frey@ecogea.fr
	X	GANT Magali	EDF CIH	magali.gant@edf.fr
	X	GUILLAS Laurene	EDF Hydro Est	laurene.guillas@edf.fr
	X	JACQUELET Isabelle	EDF Délégation bassin RMC	isabelle.jacquelet@edf.fr
X	X	LAGARRIGUE Thierry	ECOGEA	thierry.lagarrigue@ecogea.fr
	X	LEMAY Virginie	HYDROSTADIUM	virginie.lemay@hydrostadium.fr
	X	MARTY Perrine	EDF Hydro Sud-Ouest	perrine.marty@edf.fr
X	X	MATAIX Vincent	EDF CIH	vincent.mataix@edf.fr
	X	MAUREL François	EDF Attaché bassin Adour-Garonne	francois.maurel@edf.fr
X	X	MERCIER Olivier	OFB Pôle écohydraulique	olivier.mercier@ofb.gouv.fr
	X	MERIGOUX-LHOPITAL Sylvie	EDF R&D - LNHE	sylvie.merigoux-lhopital@edf.fr
	X	MOSSERI Julie	EDF Hydro Méditerranée	julie.mosseri@edf.fr
	X	REYNIER Thomas	EDF Hydro Centre	thomas.reynier@edf.fr
X	X	RICHARD Sylvain	OFB Pôle écohydraulique	sylvain.richard@imft.fr
X	X	TETARD Stéphane	ICEO	stetard@iceo-environnement.fr
	X	TISSOT Hervé	EDF Hydro Alpes	herve.tissot@edf.fr
	X	TISSOT Laurence	EDF R&D - LNHE	laurence.tissot@edf.fr
X	X	TOMANOVA Sylvie	OFB Pôle écohydraulique	sylvie.tomanova@ofb.gouv.fr
	X	TOUSSET Nicolas	EDF Hydro Sud-Ouest	nicolas.tousset@edf.fr

<b>EDF R&amp;D</b>	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	<b>6125-3313-2020-00368-FR</b> <b>Version 1.0</b>
--------------------	---	--

## **AVERTISSEMENT / CAUTION**

L'accès à ce document, ainsi que son utilisation, sont strictement limités aux personnes expressément habilitées par EDF.

EDF ne pourra être tenu responsable, au titre d'une action en responsabilité contractuelle, en responsabilité délictuelle ou de toute autre action, de tout dommage direct ou indirect, ou de quelque nature qu'il soit, ou de tout préjudice, notamment, de nature financière ou commerciale, résultant de l'utilisation d'une quelconque information contenue dans ce document.

Les données et informations contenues dans ce document sont fournies "en l'état" sans aucune garantie expresse ou tacite de quelque nature que ce soit.

Toute modification, reproduction, extraction d'éléments, réutilisation de tout ou partie de ce document sans autorisation préalable écrite d'EDF ainsi que toute diffusion externe à EDF du présent document ou des informations qu'il contient est strictement interdite sous peine de sanctions.

-----

The access to this document and its use are strictly limited to the persons expressly authorized to do so by EDF.

EDF shall not be deemed liable as a consequence of any action, for any direct or indirect damage, including, among others, commercial or financial loss arising from the use of any information contained in this document.

This document and the information contained therein are provided "as are" without any warranty of any kind, either expressed or implied.

Any total or partial modification, reproduction, new use, distribution or extraction of elements of this document or its content, without the express and prior written consent of EDF is strictly forbidden. Failure to comply to the above provisions will expose to sanctions.

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## Contributions au projet

Le projet EFFIGRI a mobilisé la contribution de nombreux partenaires, impliqués sur le terrain, dans le post-traitement des données de radiopistage, dans les analyses de données et dans la rédaction de ce rapport.

### Auteurs du rapport :

**OFB Pôle Ecohydraulique** : Sylvie TOMANOVA, Dominique COURRET, Olivier MERCIER, Sylvain RICHARD

**EDF R&D** : Laurence TISSOT, Stéphane TETARD, Eric DE OLIVEIRA

**ECOGEA** : Aurélien FREY, Thierry LAGARRIGUE

**EDF CIH** : Vincent MATAIX

**PPRIME** : Manon DEWITTE

### Contribution au projet EFFIGRI :

**OFB Pôle Ecohydraulique** : Alexis RENE, Alain ALRIC

### 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, Lilian CANTOS (propriétaire d'exploitation), Joseph LAROSE (responsable d'exploitation) et Nathalie LAFFERRERIE (responsable QSE) pour leur disponibilité, la mise à disposition des sites des centrales de Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot et pour la transmission des données d'exploitation des centrales.
- **EDF HYDRO Sud-Ouest** et le groupe d'exploitation hydraulique (GEH) Aude/Ariège, 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.
- **Le Parc Naturel Régional (PNR) du marais poitevin**, Sophie DER MIKAELIAN pour l'approvisionnement en anguilles argentées.
- 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 (dossier n°APAFIS#13977-2017032916355870 v4). L'étude a fait l'objet d'autorisations administratives délivrées par les DDT(M) des Deux-Sèvres et de l'Ariège, et a respecté les consignes sanitaires (recherches des agents pathogènes) de la DDCSPP de l'Ariège.

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## Synthèse opérationnelle

L'objectif principal de cette étude est **d'évaluer, pour les anguilles en dévalaison au stade argenté, 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, associé à un ou plusieurs exutoire(s) de dévalaison -, **afin d'en valider ou non les critères de conception**.

L'étude s'est déroulée au cours des hivers 2017-2018 et 2018-2019, sur **cinq aménagements hydroélectriques situés en série sur le même tronçon de l'Ariège**, avec d'amont en aval : Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes, Guilhot (tous équipés d'un plan de grille incliné ; débit d'équipement de 28 à 45 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) et Pébernat (équipé d'un plan de grille orienté dans le prolongement de la berge, débit d'équipement de 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Le déplacement sur ce tronçon de 194 anguilles argentées de tailles comprises entre 549 mm et 955 mm (moyenne 673 mm) a été suivi par radiotéléométrie.

Les deux hivers de suivis apparaissent **contrastés d'un point de vue hydrologique**, avec un débit médian de l'Ariège à Foix de 60 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> pour l'hiver 2017-2018 et de 30 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> pour l'hiver 2018-2019 (période du 1<sup>er</sup> décembre au 25 mai), pour un module de 39 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Ce contexte hydrologique conditionne directement la répartition des anguilles au droit des aménagements : en condition d'hydraulicité soutenue (hiver 2017-2018), elles transitent majoritairement par les ouvrages évacuateurs (Crampagna : 75%, Las Rives : 62%, Las Mijeannes : 48%, Guilhot : 55%), alors qu'elles franchissent principalement par les prises d'eau lorsque l'hydraulicité est réduite (Crampagna : 71%, Las Rives : 81%, Las Mijeannes : 90%, Guilhot : 78%). A Pébernat, le principe est le même mais le positionnement de la vanne-toit au niveau de la prise d'eau, qui est utilisée prioritairement pour décharger le débit excédentaire, entraîne une majorité des franchissements vers cette dernière en période de forte hydraulicité (89% pour l'hiver 2017-2018 contre 47% pour l'hiver 2018-2019).

**L'évaluation de l'efficacité des prises d'eau** se base ainsi sur la présentation de 45 à 74 anguilles argentées selon les sites. Pour les quatre prises d'eau à plan de grille incliné (Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot), l'efficacité des prises d'eau **Ef (%)** et le taux de franchissement global **Fr (%)** sont de 100%, c'est-à-dire qu'aucun individu n'est passé à travers les grilles des prises d'eau. Compte tenu de la taille des anguilles marquées et suivies, l'espacement libre entre les barreaux (20 mm) associé à la forte inclinaison des plans de grille, jouent ainsi un rôle de barrières physique et comportementale très efficaces pour empêcher tout passage au travers du plan de grille.

En ce qui concerne Pébernat, équipé d'un plan de grille orienté dans le prolongement de la berge, l'efficacité de l'exutoire et de la vanne-toit associée est estimée à 93,3% et le taux de franchissement global à 97,2%. Deux individus ont été entraînés à travers la grille de prise d'eau. De fortes vitesses d'approche localisées, induites par des hétérogénéités de l'écoulement au droit de la prise d'eau dues à la configuration du site et aux difficultés de nettoyage de la grille par le dégrilleur, pourraient en être la cause.

**Les temps de franchissement des individus**, à partir du moment où ils se présentent devant la prise d'eau, sont relativement rapides pour les quatre prises d'eau à plan de grille incliné, puisque 75% des individus empruntent les exutoires en moins de 5 minutes et 90% en moins de 40 minutes. Ces temps apparaissent plus courts lors de la campagne 2017-2018 pour laquelle l'hydraulicité a été soutenue. Par ailleurs, les résultats tendent à montrer que les temps de passage peuvent être plus importants pour les prises d'eau les plus profondes, pour lesquelles le temps de nage des anguilles le long de la grille pour rejoindre les exutoires de surface est plus long.

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

Les temps de passage relevés sur le site de Pébernat ne sont pas comparables avec les aménagements précédents, en raison de la configuration de la prise d'eau qui induit des distances plus importantes entre les différentes antennes. Si d'une manière globale 75% des anguilles franchissent la prise d'eau en moins de 3,6 heures, les résultats sont très variables entre les voies de franchissement (exutoire et vanne-toit) et entre les deux périodes de suivi. En ce qui concerne les temps de passage au niveau de l'exutoire, ils apparaissent plus réduits lors de l'hiver 2017-2018 à l'hydrologie soutenue (75% des franchissements en moins de 6,9 heures) par rapport à l'hiver 2018-2019 (75% des franchissements en moins de 2,9 jours).

Ces résultats viennent compléter ceux diffusés récemment pour les smolts de saumon atlantique (Frey *et al.* 2020) ainsi que les précédents retours d'expérience acquis en France (Tomanova *et al.* 2018a) et à l'étranger (Calles *et al.* 2010; Calles *et al.* 2013). **Ils renforcent la validation des critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles préconisées en France** (Courret et Larinier 2008; Courret *et al.* 2015) et confirment ainsi tout l'intérêt de ces dispositifs pour réduire très efficacement les risques d'entraînement des poissons dans les prises d'eau hydroélectriques de petite et moyenne tailles (débit d'équipement  $\leq 50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), pour les smolts de saumon atlantique et les anguilles argentées.



EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## Sommaire

<b>AVERTISSEMENT / CAUTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CONTRIBUTIONS AU PROJET</b> .....	<b>2</b>
<b>SYNTHÈSE OPÉRATIONNELLE</b> .....	<b>3</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>5</b>
<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS</b> .....	<b>6</b>
<b>2. SITES D'ÉTUDE</b> .....	<b>7</b>
2.1. RIVIÈRE ARIÈGE ENTRE FOIX ET PAMIERS.....	7
2.1.1. <i>Crampagna</i> .....	8
2.1.2. <i>Las Rives</i> .....	9
2.1.3. <i>Las Mijeannes</i> .....	10
2.1.4. <i>Guilhot</i> .....	10
2.1.5. <i>Pébernat</i> .....	11
2.2. SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES DES PRISES D'EAU .....	12
<b>3. MATÉRIEL ET MÉTHODE</b> .....	<b>12</b>
3.1. PÉRIODE D'ÉTUDE .....	12
3.2. RADIOTÉLÉMÉTRIE .....	12
3.2.1. <i>Principe</i> .....	12
3.2.2. <i>Matériel</i> .....	13
3.2.3. <i>Provenance des anguilles et marquage</i> .....	14
3.2.4. <i>Suivi au droit de chaque site</i> .....	15
3.2.5. <i>Suivi mobile</i> .....	18
3.2.6. <i>Validation et analyses des données</i> .....	18
3.3. SUIVIS DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES .....	20
3.3.1. <i>Débit de l'Ariège</i> .....	20
3.3.2. <i>Fonctionnement des aménagements hydroélectriques</i> .....	20
<b>4. RÉSULTATS</b> .....	<b>21</b>
4.1. CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES .....	21
4.1.1. <i>Débits</i> .....	21
4.1.2. <i>Fonctionnement des usines</i> .....	21
4.2. ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES DISPOSITIFS DE DÉVALAISON .....	22
4.2.1. <i>Nombre d'individus détectés pour l'analyse de l'efficacité</i> .....	22
4.2.2. <i>Efficacité des prises d'eau et taux de franchissement global</i> .....	23
4.2.3. <i>Temps de franchissement</i> .....	25
<b>5. DISCUSSION</b> .....	<b>28</b>
5.1. MIGRATION DES ANGUILLES ENTRE DEUX ANNÉES HYDROLOGIQUEMENT DIFFÉRENTES .....	28
5.2. EFFICACITÉ DES PRISES D'EAU .....	29
5.3. TEMPS DE FRANCHISSEMENT .....	29
5.3.1. <i>Aménagements à plan de grille incliné</i> .....	29
5.3.2. <i>Aménagement de Pébernat</i> .....	30
5.4. MISE EN PERSPECTIVE AVEC LES TRAVAUX ANTÉRIEURES .....	31
5.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	32
<b>6. RÉFÉRENCES</b> .....	<b>34</b>

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## 1. Contexte et objectifs

Depuis plusieurs dizaines d'années, des programmes de restauration et de protection des poissons migrateurs ont été mis en place en France. Concernant la **libre circulation des poissons, les efforts se sont portés en premier lieu sur la restauration de la continuité piscicole vers l'amont avant de s'intéresser plus récemment aux questions relatives à la dévalaison** (diagnostics, dispositifs) (Larinier et Travade 1999).

Au niveau des aménagements hydroélectriques, le passage des poissons par les turbines peuvent causer des mortalités importantes (Gomes et Larinier 2008). 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 parfois important d'aménagements hydroélectriques sur leur parcours de migration. L'**anguille européenne** au stade argenté (*Anguilla anguilla*) est également particulièrement concernée, du fait de sa taille importante pouvant engendrer des taux de mortalité élevés.

Une des solutions pour limiter l'entraînement des poissons vers les turbines consiste en la mise en place d'un dispositif de protection au niveau de la prise d'eau. L'objectif est d'obtenir moins de 1% de taux de mortalité à l'échelle de l'aménagement pour ne pas dépasser 5-10% de mortalité cumulée sur l'intégralité de la dévalaison d'un individu (Tomanova *et al.* 2018a). A partir de retours d'expériences acquis en France et à l'étranger sur l'efficacité d'exutoires de dévalaison existants, les bases de conception et de dimensionnement pour les nouvelles prises d'eau ont été définies en 2008 pour les rendre « ichtyocompatibles » (Courret et Larinier 2008). Une prise d'eau ichtyocompatible doit permettre (1) d'arrêter les poissons et les empêcher ainsi de passer par les turbines, (2) de les guider vers un système de transfert (exutoire) et (3) de les acheminer à l'aval de l'aménagement sans dommage. Sur ces principes, deux types de conception ressortent afin de respecter ces critères : **la configuration à plan de grille incliné par rapport à l'horizontale (angle  $\leq 26^\circ$ ) et la configuration orientée par rapport à la direction de l'écoulement (angle  $\leq 45^\circ$ ). Ces deux configurations sont associées à une grille présentant un faible espacement entre barreaux ( $< 20\text{-}25\text{ mm}$ ) et à des exutoires de dévalaison**. L'ensemble des critères pris en compte dans le dimensionnement est précisément décrit dans Courret et Larinier (2008). Par la suite, des études hydrauliques sur modèle réduit ont permis de confirmer et de préciser certains critères concernant l'implantation des plans de grille et la conception des exutoires. Elles ont également permis de produire des formules d'évaluation des pertes de charge adaptées aux configurations préconisées (Raynal *et al.* 2012; Raynal *et al.* 2013b).

Depuis 2008, plusieurs prises d'eau ichtyocompatibles conformes aux préconisations de Courret et Larinier (2008), ont pu être installées en France, et **il est devenu possible de vérifier leur efficacité biologique *in situ***. En 2015 et 2016, le Pôle Ecohydraulique OFB-IMFT-P' et EDF R&D ont réalisé des **tests d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour les smolts de saumon atlantique au niveau de quatre centrales hydroélectriques** (trois avec plan de grille incliné et une avec plan de grille orienté) **à faible débit d'équipement** (entre 4 et 20 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> au moment des tests) (Tomanova *et al.* 2017; Tomanova *et al.* 2018b). Les résultats obtenus sur ces sites donnent des efficacités minimales de passage par les exutoires comprises entre 80,7% et 87,5%, ce qui est considéré comme satisfaisant et donne du crédit aux critères de conception proposés.

A la suite de ces premiers tests, le Pôle Ecohydraulique OFB-IMFT-P' et EDF (R&D et CIH) ont initié le **projet EFFIGRI en 2017** pour étudier **l'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles sur des aménagements hydroélectriques à plus forts débits d'équipement** (entre 30 et 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Ainsi, **cinq ouvrages situés en série sur la rivière Ariège ont fait l'objet de mesures d'efficacité par radiotélémetrie de poissons** : quatre ouvrages amont avec plan de grille incliné (propriétés de la

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

société Ondulia), et un ouvrage aval avec plan de grille orienté par rapport à l'écoulement (exploité par EDF). Le projet EFFIGRI s'est intéressé à **deux espèces de poissons migrateurs : le saumon atlantique et l'anguille européenne**. L'étude sur les smolts de saumon atlantique a fait l'objet d'un premier rapport (Frey *et al.* 2020) et d'une publication scientifique (Tomanova *et al.* 2021). **Le présent rapport restitue quant à lui les résultats obtenus pour les anguilles.**

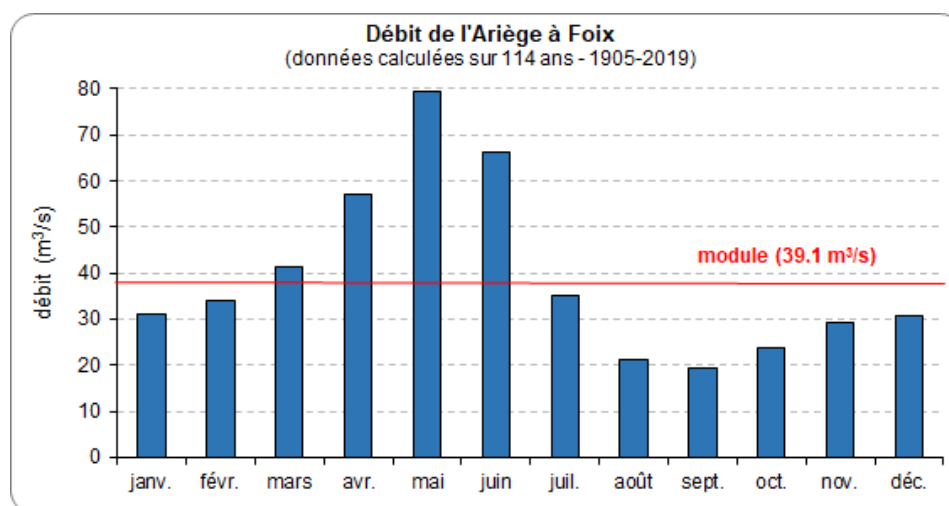
Au total **194 anguilles européennes au stade argenté** (taille >550 mm) ont été marquées avec un émetteur radio et lâchées en amont des sites étudiés au cours des **hivers 2017-2018 et 2018-2019**. Un réseau de récepteurs radio installés au niveau de chaque aménagement, a permis d'identifier la voie de franchissement de chaque individu. **L'objectif de ce rapport est d'analyser ces données au niveau de chaque aménagement afin (i) d'identifier les voies de franchissement empruntées par les anguilles et calculer l'efficacité de chaque prise d'eau et (ii) de calculer le temps de franchissement par l'exutoire et par les autres voies de passage sans dommage.**

## 2. Sites d'étude

### 2.1. Rivière Ariège entre Foix et Pamiers

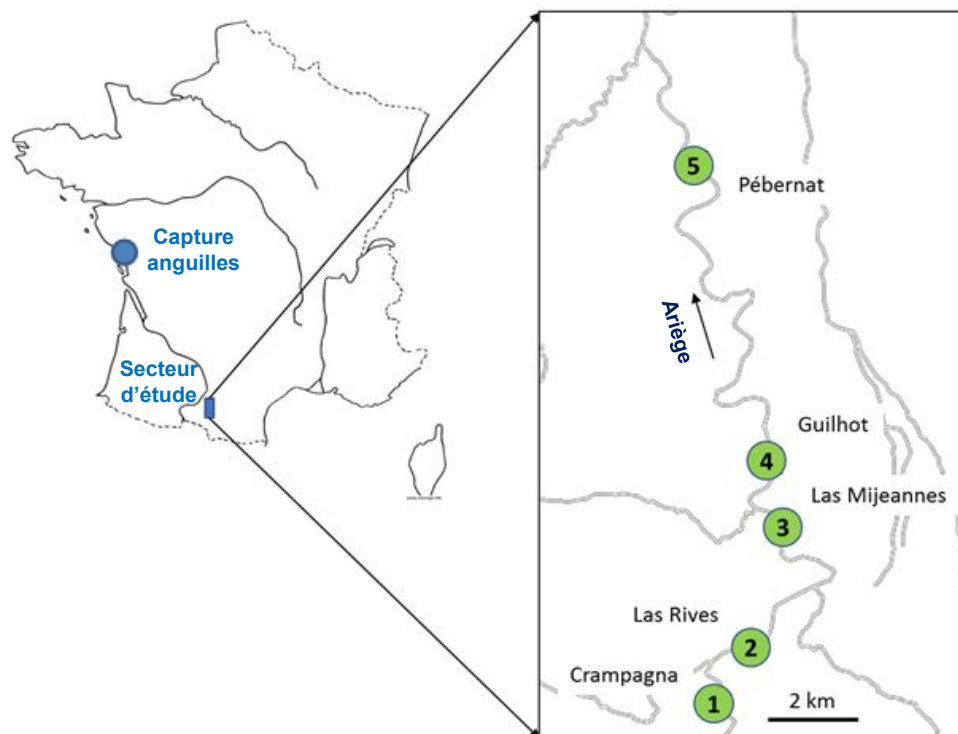
**Le suivi de la dévalaison des anguilles a été réalisé sur un tronçon de 25 km environ de la rivière Ariège, situé dans le département du même nom.**

L'Ariège est un affluent rive droite de la Garonne et son module (débit moyen interannuel) à Foix est de  $39,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (période 1905-2019, source Banque Hydro, station n°O1252510). 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 deux fois le module. Dès le mois de juillet, le débit diminue rapidement pour atteindre la période d'étiage entre la fin d'été et le début d'automne.



**Figure 1.** Débits moyens mensuels de l'Ariège à Foix (chronique 1905-2019, source : <http://hydro.eaufrance.fr/>)

**Le tronçon étudié comporte cinq centrales hydroélectriques en série, de l'amont vers l'aval : Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes, Guilhot, toutes quatre propriétés du Groupe Ondulia, et Pébernat, aménagement exploité par EDF (Figure 2).**



**Figure 2.** Présentation du secteur d'étude sur l'Ariège entre Foix et Pamiers (département de l'Ariège)

Les cinq aménagements sont consécutifs et assez proches : les barrages de Crampagna et de Las Rives sont distants d'environ 2 km, les barrages de Las Rives et de Las Mijeannes d'environ 4 km, les barrages de Las Mijeannes et de Guilhot d'environ 2 km et les barrages de Guilhot et de Pébernat d'environ 12 km. A 7 km environ en aval de Guilhot, la prise d'eau de la digue du Foulon alimente des canaux de la ville de Pamiers. Cet aménagement est 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 cinq aménagements hydroélectriques étudiés ont été récemment équipés de prises d'eau ichthyocompatibles, qui suivent l'ensemble des préconisations de Courret et Larinier (2008), avec **des plans de grille inclinés sur les quatre sites amont (Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot) et un plan de grille orienté dans le prolongement de la berge à Pébernat**. Le plan de grille de chaque prise d'eau est équipé d'un dégrilleur couplé à une goulotte d'évacuation des dégrillats. Cette goulotte est de type mixte sur les quatre sites amont, c'est-à-dire que les dégrillats sont évacués par la goulotte de dévalaison des poissons. Les dispositifs sont tous implantés en tête du canal d'amenée des aménagements, qui court-circuitent chacun un tronçon plus ou moins long de l'Ariège. Les modules calculés au niveau des ouvrages, sont compris entre  $41,8$  et  $44,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et les débits d'équipement entre  $28$  et  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Tableau 1). La description détaillée de chaque site (en dehors de Crampagna) est disponible dans le rapport des résultats obtenus sur les smolts (Frey *et al.* 2020). Leur description ci-dessous est donc réduite.

### 2.1.1. Crampagna

La prise d'eau de la centrale hydroélectrique de Crampagna, propriété d'Ondulia, est l'aménagement le plus en amont de l'étude. Elle se situe sur la commune de Crampagna (09). La configuration générale de l'aménagement est schématisée en Figure Figure 3.

L'aménagement de Crampagna est composé d'une digue d'environ 140 m de long et pour une hauteur comprise entre 1,75 et 1,95 m (Photo 1), qui dérive l'eau de l'Ariège vers une centrale par un canal

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

d'aménée long de 370 m pour une section de 20 m<sup>2</sup> environ. Le tronçon court-circuité ainsi créé mesure 600 m. La centrale est composée de 2 turbines Kaplan de 18 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> et 10 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, soit un débit d'équipement de 28 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

La prise d'eau mesure 12 m de large et 2,6 m de profondeur, et est équipée d'un plan de grille fine incliné à 26° avec un espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 2). Le plan de grille guide les poissons vers trois exutoires de surface de 0,63 m de profondeur en eau pour 0,5 m de large. Le débit total transitant par les exutoires est de 0,84 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, soit 3% du débit d'équipement de la prise d'eau.



Photo 1. Seuil de Crampagna



Photo 2. Plan de grille et exutoires de Crampagna

### 2.1.2. Las Rives

La prise d'eau de la centrale hydroélectrique de Las Rives se situe sur la commune de Varilhes (09) et appartient au groupe Ondulia. La configuration générale de l'aménagement de Las Rives est schématisée en Figure Figure 3.

La prise d'eau est composée d'une digue d'environ 220 m de long et de 4,3 m de haut (Photo 3). Le tronçon court-circuité mesure 530 m. Le débit d'équipement de la prise d'eau est de 45 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

La prise d'eau principale mesure 14 m de large et est équipée d'un plan de grille fine incliné à 26° avec un espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 4). Le plan de grille guide les poissons vers trois exutoires de 0,5 m de profondeur en eau pour 1 m de large. Le débit total transitant par les exutoires est de 1,35 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, soit 3% du débit d'équipement de la prise d'eau.



Photo 3. Seuil de Las Rives



Photo 4. Plan de grille et exutoires de Las Rives



### 2.1.3. Las Mijeannes

La prise d'eau de la centrale de Las Mijeannes, propriété du groupe Ondulia, se situe à Rieux de Pelleport (09). La configuration générale de l'aménagement de Las Mijeannes est schématisée en Figure Figure 3.

La prise d'eau est composée d'une digue de 130 m de long et de 1,65 à 2,25 m de haut (Photo 5). Le tronçon court-circuité mesure 1350 m. Le débit d'équipement de la prise d'eau est de  $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

La prise d'eau mesure 21,6 m de large et est équipée d'un plan de grille fine incliné à  $26^\circ$  avec un espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 6). Le plan de grille guide les poissons vers trois exutoires de 0,7 m de profondeur en eau pour 0,72 m de large. Le débit total transitant par les exutoires est de  $1,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , soit 3% du débit d'équipement de la prise d'eau.



Photo 5. Seuil de Las Mijeannes



Photo 6. Plan de grille et exutoires de Las Mijeannes

### 2.1.4. Guilhot

La prise d'eau de la centrale hydroélectrique de Guilhot, propriété du groupe Ondulia, se situe sur la commune de Benagues (09). La configuration générale de l'aménagement est présentée en Figure Figure 3.

La prise d'eau est composée d'une digue d'environ 130 m de long et de 2,2 m de haut (Photo 7). Le tronçon court-circuité mesure 1920 m. Le débit d'équipement de la prise d'eau est de  $33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

La prise d'eau, large de 15 m, est équipée d'un plan de grille fine incliné à  $26^\circ$  et à espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 8). Le plan de grille est équipé de trois exutoires de 0,65 m de profondeur en eau pour 0,57 m de large. Le débit total transitant par les exutoires est de  $0,99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , soit 3% du débit de la prise d'eau.



Photo 7. Seuil de Guilhot

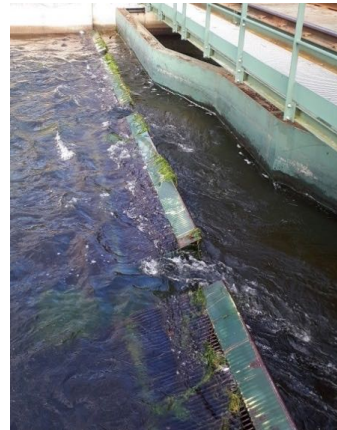


Photo 8. Plan de grille, exutoires et début du canal de transfert de Guilhot

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

### 2.1.5. Pébernat

La prise d'eau de Pébernat située au lieu-dit « La Cavalerie » sur la commune de Pamiers (09) est exploitée par EDF (groupement d'usines de Ferrières). Elle est située la plus en aval du secteur d'étude. La configuration générale de l'aménagement de Pébernat est schématisée en Figure Figure 3.

L'eau est dérivée par un barrage de 85 m composé d'un mur déversant d'environ 45 m et de deux clapets de régulation de 15 m chacun (Photo 9 en situation de restitution du débit réservé et Photo 10 en situation de fort déversement,  $140 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à Foix). La hauteur du barrage est de 2,5 m. Le tronçon court-circuité de Pébernat mesure 6 km environ. Le débit d'équipement de la prise d'eau est de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Dans le prolongement de la prise d'eau se trouve une vanne secteur (évacuation des corps flottants) et une vanne-toit (régulation de la cote du plan d'eau amont de la prise d'eau).



**Photo 9.** Clapets de régulation du barrage de Pébernat en situation de restitution du débit réservé



**Photo 10.** Clapets de régulation du barrage de Pébernat en situation de fort déversement

La prise d'eau, large de 60 m, est équipée d'un plan de grille fine orienté (dans le prolongement de la berge en rive droite) à espacement libre entre les barreaux de 20 mm (Photo 11). La hauteur mouillée de la grille est de 1,75 m et son inclinaison par rapport au fond est de  $85^\circ$ . La surface immergée de la grille est de  $105 \text{ m}^2$ . Le plan de grille guide les poissons vers un unique exutoire situé en aval du plan de grille et placé au milieu de la vanne secteur (Photo 12). L'exutoire mesure 2 m de large et délivre un débit de  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une charge hydraulique de 0,70 m (soit 4% du débit de la prise d'eau).



**Photo 11.** Vue aval du plan de grille orienté de la prise d'eau de Pébernat



**Photo 12.** Vue aval de l'exutoire (à gauche) et de la vanne-toit (à droite)

## 2.2. Synthèse des caractéristiques des prises d'eau

Le Tableau 1 présente une synthèse des principales caractéristiques des cinq prises d'eau étudiées.

**Tableau 1.** Caractéristiques des cinq prises d'eau étudiées

		Crampagna	Las Rives	Las Mijeannes	Guilhot	Pébernat
Module Ariège	$m^3.s^{-1}$	41,8	41,8	44,2	44,2	44,8
Débit équipement ( $Q_{eq}$ )	$m^3.s^{-1}$	28	45	45	33	50
Largeur prise d'eau	$m$	12	14	21,6	15	27
Hauteur d'eau	$m$	2,60	4,18	2,58	2,65	2,50
Type grille	-	Incliné	Incliné	Incliné	Incliné	Orienté
Inclinaison	°	26	26	26	26	85
Orientation	°	90	90	90	90	0*
Obturation du sommet de grille	-	non	Oui (sur 0,5 m)	non	non	non
Surface grille	$m^2$	71,2	117,5	127,2	90,8	105
Vitesse normale pour débit max	$m.s^{-1}$	0,39	0,38	0,35	0,35	0,48
Espace barreaux	$mm$	20	20	20	20	20
Nb exutoires	-	3	3	3	3	1
Largeur exu	$m$	0,5	1	0,72	0,57	2
Profondeur eau exu	$m$	0,63	0,5	0,7	0,65	0,7
Débit dévalaison	$m^3.s^{-1}$	0,84	1,35	1,35	0,99	2
	% $Q_{eq}$	3	3	3	3	4
Type goulotte (poissons/dégrillats)	-	Mixte	Mixte	Mixte	Mixte	Séparé

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

## 3. Matériel et méthode

### 3.1. Période d'étude

L'étude s'est déroulée lors des hivers 2017-2018 et 2018-2019 durant la période de dévalaison naturelle des anguilles européennes (Durif et Elie 2008; Righton *et al.* 2016). Pour la première année de suivi, l'installation des sites et les essais concernant le fonctionnement général du matériel de radiotélémetrie, ainsi que la calibration des antennes, ont été réalisés en fin d'été 2017 et **le suivi s'est déroulé du 10 janvier au 19 avril 2018** (jusqu'au 8 mai sur Crampagna uniquement) dès lors que des anguilles ont pu être capturées et marquées (voir ci-après). Pour la seconde année, l'installation du matériel a été réalisée en fin d'été 2018 et le suivi a été mené du **7 décembre 2018 au 28 mars 2019**.

### 3.2. Radiotélémetrie

#### 3.2.1. Principe

Les objectifs de l'étude étaient de suivre individuellement chaque anguille à distance et d'identifier sa voie de franchissement au niveau de chacun des cinq aménagements hydroélectriques (où et quand). La radiotélémetrie répondait à ces besoins. Le protocole utilisé



EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

lors des deux années d'étude a consisté à lâcher en amont de l'aménagement de Crampagna des anguilles équipées d'un émetteur radio avec un code individuel. Leurs déplacements ont été suivis grâce à des enregistrements automatiques au niveau de chaque aménagement, complétés par des repérages manuels sur tout le tronçon. Ces enregistrements permettent d'étudier le comportement des poissons à l'approche des aménagements suivis, et de déterminer la voie de passage empruntée lors du franchissement de l'aménagement (exutoires, turbines, digue/barrage/vanne).

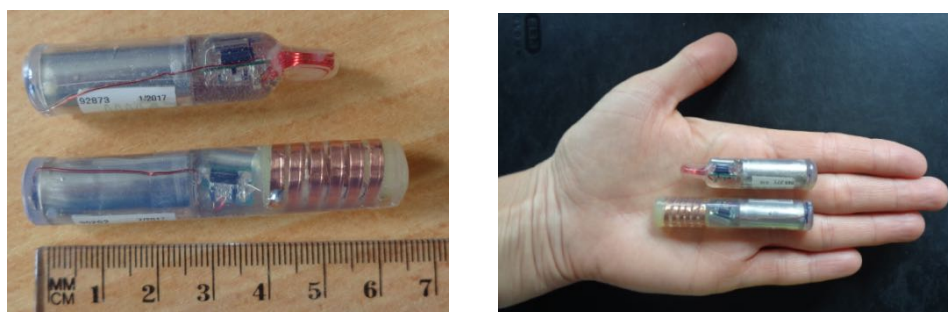
### 3.2.2. Matériel

#### 3.2.2.1. Emetteurs

Le choix des émetteurs résulte d'un compromis entre les critères suivants :

- La plus petite taille/poids de l'émetteur possible pour causer le moins de gêne au poisson ;
- La pulsation maximale garantissant le décodage des émetteurs dans les zones à forte vitesse de courant ;
- La durée de vie des émetteurs pour garantir leur fonctionnement et des enregistrements sur une durée suffisante pour l'atteinte des objectifs de l'étude ;
- Le choix des codes maximisant la durée de vie des batteries (en radiopistage, il y a une relation directe entre le code et la durée de vie de la batterie).

**Les émetteurs codés de la série F1200 (ATS® Advanced Telemetry Systems), avec antenne encapsulée**, qui permettent de suivre plusieurs poissons simultanément sur une seule fréquence, ont été retenus pour le marquage des anguilles (Photo 13). Les émetteurs mesuraient 64 mm le premier hiver de suivi et 53 mm le second hiver (modifications par le constructeur avec un encapsulage de l'antenne différent).



**Photo 13.** Emetteurs utilisés lors des deux hivers de suivi

Compte tenu des petites zones surveillées dans lesquelles les poissons peuvent progresser très rapidement (comme les goulottes de dévalaison), la pulsation maximale 45,8 ppm (pulsation par minute) a été nécessaire pour garantir une bonne détection.

La durée de vie des batteries garantie par le constructeur est de 25 jours mais en pratique ce type d'émetteur peut fonctionner plus de 100 jours. Pour maximiser leur durée de vie, il a été décidé d'avoir recours à deux fréquences différentes en retenant les 50 codes les moins énergivores de chaque fréquence. Finalement, les émetteurs ont fonctionné 130-160 jours, durée suffisante compte tenu du caractère dévalant des anguilles lâchées et de la longueur modérée du tronçon étudié (25 km).

Chaque récepteur scannait donc deux fréquences alternativement. Cependant, des tests de détection préalables ont mis en évidence de possibles défauts de décodage dans les zones à passage rapide (goulotte de dévalaison à fort courant). Pour pallier ce problème, les récepteurs installés dans les goulottes de dévalaison ont été doublés et chacun ne scannait en permanence qu'une seule fréquence.

### 3.2.2. Récepteurs-enregistreurs

Des **stations de réception fixes, composées de récepteur-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 14). Ces stations sont reliées à des antennes réceptrices, aériennes (de type antenne boucle) ou immergées (de type câble radio coaxial RG 58 avec partie inférieure dénudée de 17 cm de longueur).



**Photo 14.** Exemples d'installations de récepteur-enregistreurs utilisés pour la détection des anguilles sur l'Ariège

### 3.2.3. Provenance des anguilles et marquage

Du fait du faible nombre d'anguilles présentes sur l'Ariège, **les anguilles argentées en cours de dévalaison ont été capturées sur la Sèvre Niortaise**, au niveau d'une pêcherie d'avalaison expérimentale gérée par le Parc naturel régional du Marais poitevin, puis transportées vers l'Ariège pour les besoins de l'étude.

Après leur transport, les anguilles ont été stabulées dans des bacs circulaires (1,8 m de diamètre), alimentés en continu par l'eau de l'Ariège dans le bâtiment de la centrale hydroélectrique de Crampagna (Photo 15). Afin de diminuer la durée de stabulation et le risque d'arrêt de la dévalaison, les poissons ont été marqués pendant les deux jours qui ont suivis leur arrivée, et tous relâchés la troisième journée.



**Photo 15.** Bacs de stabulation des anguilles dans un bâtiment de la centrale de Crampagna

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

Les anguilles qui ont fait l'objet du marquage ont été sélectionnées selon des critères de bon état général, de leur poids et de leur taille (ciblée à plus de 550 mm). Avant toute manipulation, les poissons, ont été anesthésiés à l'aide d'une solution à base d'huile essentielle de clou de girofle (eugénol à 15%) dans les proportions de 15 ml de cette solution pour 20 l d'eau. Les poissons ont été pesés (au g près) et plusieurs mesures ont été réalisées (notamment la longueur totale et la largeur de la tête au mm près) avant de les marquer. L'émetteur a été inséré dans la cavité intrapéritonéale par intervention chirurgicale (Photo 16).



Photo 16. Marquage des anguilles

L'objectif fixé pour obtenir des résultats fiables est **d'avoir au moins 100 individus détectés au droit de chaque prise d'eau sur l'ensemble des deux années de suivi**. Compte tenu de divers aléas (p.ex. arrêt de migration, hydrologie défavorable, durée de fonctionnement des émetteurs), un total de 200 anguilles (100 chaque année) a été prévu initialement pour l'étude. Au final, **96 anguilles ont été marquées le premier hiver et 98 anguilles le second hiver de suivi** (Tableau 2). Toutes ont été lâchées 600 m environ en amont de la première prise d'eau étudiée (Crampagna).

Tableau 2. Récapitulatif des anguilles marquées (nombre d'individus et tailles) et dates des lâchers

	Nombre anguilles	Longueur corps (mm)			Largeur tête (mm)			Date de lâcher
		Moy.	Min	Max	Moy.	Min	Max	
<b>Janv. 2018</b>	Lot 1 : 72	643	549	930	26,9	20,9	42,6	10/01/2018
	Lot 2 : 24	676	600	769	28,6	21,0	36,7	16/01/2018
<b>Déc. 2018</b>	98	695	585	955	27,6	18,6	40,5	07/12/2018
<b>TOTAL</b>	<b>194</b>	<b>673</b>	<b>549</b>	<b>955</b>	<b>27,5</b>	<b>18,6</b>	<b>42,6</b>	

### 3.2.4. Suivi au droit de chaque site

Sur chaque site, le principe d'installation a été le même : équiper l'ensemble des voies de passage possibles (exutoires de dévalaison, turbines ou barrage) afin de déterminer les voies de franchissement empruntées par les anguilles marquées. La Figure Figure 3 présente l'implantation de chaque antenne de détection sur les cinq sites d'étude.



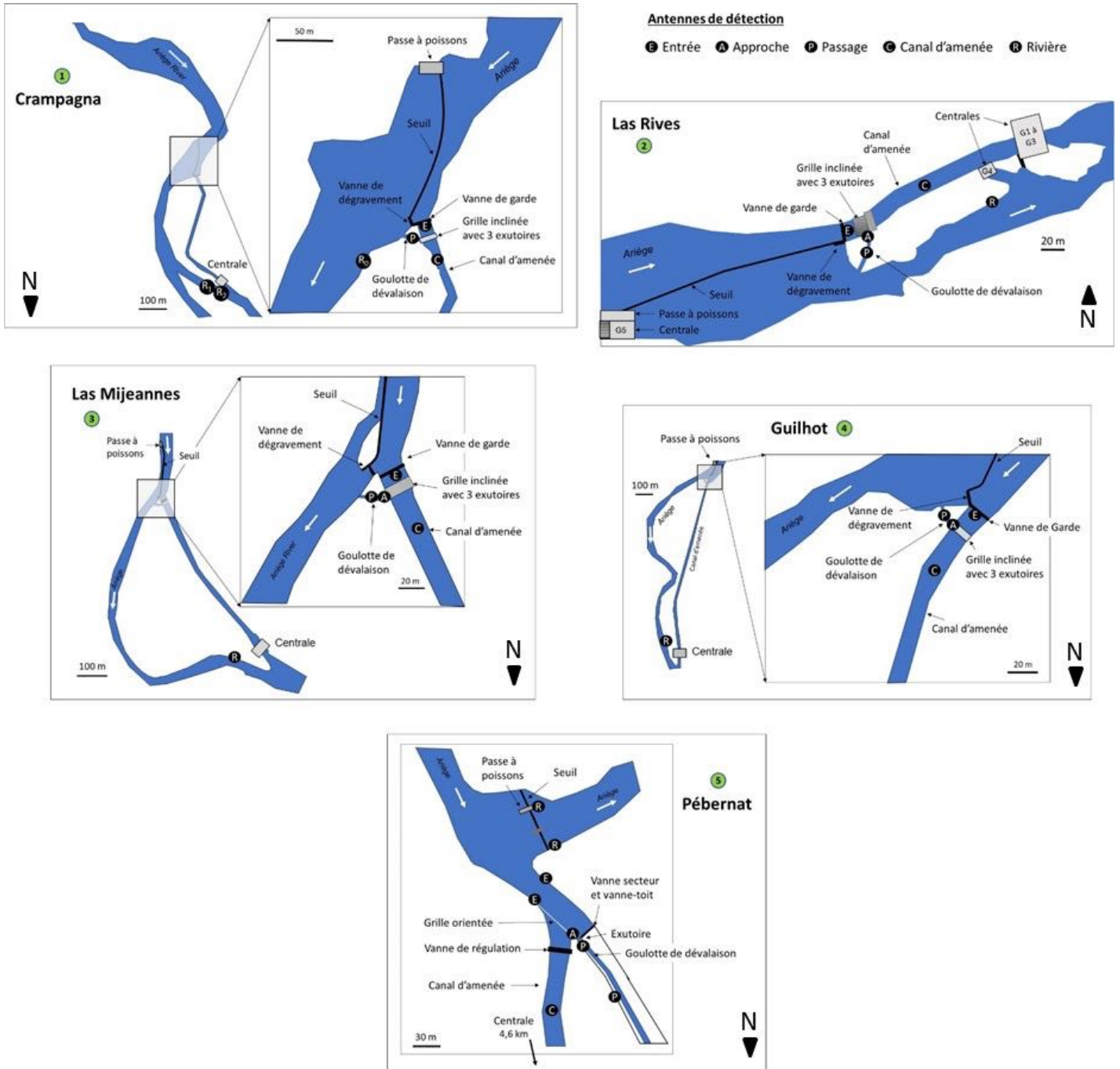


Figure 3. Plans des cinq sites d'étude et localisation des antennes de détection.

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

Les quatre prises d'eau amont (**Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot**) sont de conception très similaire et leur équipement a été identique (Figure 3) : 5 antennes ont été placées sur chaque site pour enregistrer les déplacements des poissons marqués (sauf Crampagna qui n'a pas d'antenne « approche » car la configuration de la goulotte ne le permettait pas et qui a 3 antennes dans le TCC, dont R<sub>0</sub> installée uniquement pour l'hiver 2018-2019) :

- **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 de chaque goulotte de dévalaison. Cette antenne enregistre les poissons passés par les exutoires du plan de grille et qui **approchent** la goulotte de dévalaison (sauf sur le site de Crampagna) ;
- **P** : une antenne multi-brins située dans la goulotte de dévalaison, à l'aval du seuil de contrôle (impossibilité de retour en amont), afin de valider le **passage** par la goulotte de dévalaison des poissons suivis ;
- **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** (ou la passe à poissons) qui ne sont pas passés par la prise d'eau ;
- **C** : une antenne multi-brins dans le **canal d'aménée** de l'usine, en aval du plan de grille. Cette antenne enregistre les poissons qui franchissent 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 et qui y pénètrent ;
- **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 ;
- **P<sub>e</sub>** : une antenne multi-brins en aval immédiat de la vanne secteur afin de valider le **passage** des 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 en aval de l'exutoire dans le canal de décharge. 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** : deux 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'aménée** de l'usine, en aval du plan de grille. Cette antenne enregistre les poissons qui franchissent la prise d'eau en traversant les grilles.

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 un compromis entre la maximisation de la détection et la

diminution du recouvrement entre les zones de passage. Après les tests de calibration, les forces de signal ont été ensuite utilisées pour attribuer les différentes voies de passage des poissons marqués (cf. 3.2.6).

La durée d'écoute d'un émetteur (durée nécessaire pour le détecter et le décoder) est ajustable pour chaque récepteur. Cette durée d'écoute comporte deux paramètres à régler : le temps nécessaire pour détecter la présence d'un émetteur dans la zone surveillée et le temps pour décoder l'identifiant de l'émetteur. La durée de détection d'un émetteur a été fixée à 3 secondes et la durée d'identification du code à 10 secondes sur tous les récepteurs de l'étude.

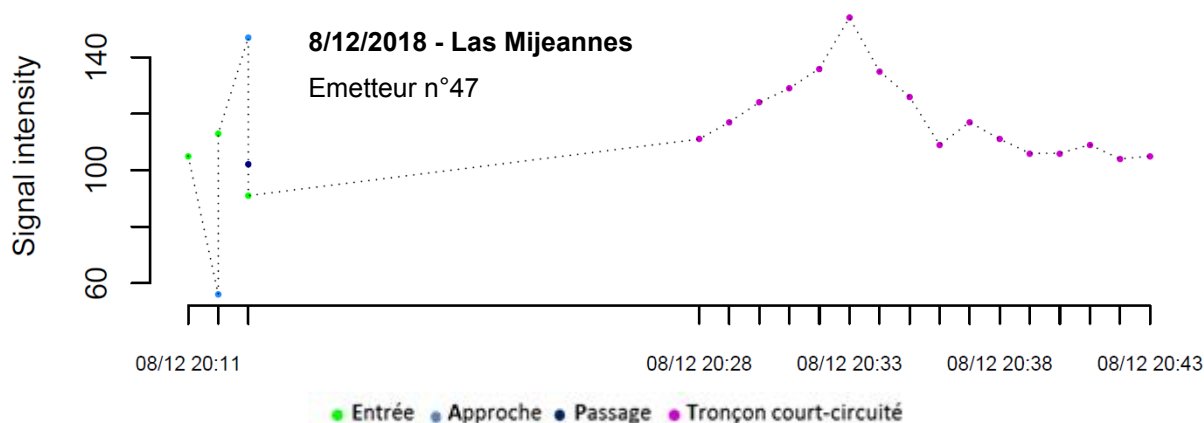
### 3.2.5. Suivi mobile

Des suivis mobiles avec une antenne aérienne et une antenne fouet installée sur le toit d'un véhicule ont été menés hebdomadairement afin de s'assurer de la position des anguilles par rapport aux données des stations d'enregistrement fixes. Ces suivis ont également permis de contrôler la durée de vie des émetteurs.

### 3.2.6. Validation et analyses des données

#### 3.2.6.1. Attribution des voies de passage

Tous les enregistrements obtenus au cours des deux campagnes de suivis ont été vérifiés et les forces de signal enregistrées analysées une par une. Pour chaque code de chaque fréquence (chaque anguille), des graphiques d'évolution de signal ont été réalisés par site (exemple Figure 4). A l'aide de ces graphiques, les voies de passages ont pu être 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 4.** Exemple de graphique d'évolution du signal généré pour chaque anguille sur chaque site (l'intensité du signal traduit la proximité du poisson par rapport à l'antenne).

Sur l'ensemble des sites, les passages « barrage » ont été obtenus par déduction, en considérant les passages par le tronçon court-circuité (antenne R) sans enregistrements 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 dégrèvement.

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

### 3.2.6.2. Calculs d'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 et empruntant avec succès les exutoires puis la goulotte de dévalaison parmi l'ensemble des poissons entrés 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.

L'**efficacité de la prise d'eau** ( $Ef$  en %) à Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot a été calculée comme étant le nombre de poissons détectés dans la goulotte de dévalaison ( $nb(EXU)$  : poissons détectés fortement aux antennes P et/ou A) divisé par le nombre de poissons détectés à l'entrée de la prise d'eau ( $nb(PE)$  : antenne E) et multiplié par 100 pour l'exprimer en pourcentage :

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

Sur le site de Pébernat, nous avons distingué l'**efficacité de l'exutoire** ( $Ef_{exu}$  en %) calculée comme étant le nombre de poissons détectés à l'exutoire et dans le canal de décharge ( $nb(EXU)$  : poissons détectés fortement aux antennes A et  $P_e$  et confirmés à l'antenne P) divisé par le nombre de poissons détectés à l'entrée de la prise d'eau ( $nb(PE)$  : antenne E) et multiplié par 100 pour l'exprimer 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 détectés dans le canal de décharge ( $nb(VT)$  : poissons détectés fortement à l'antenne P, et pas détectés ou très faiblement aux antennes A et  $P_e$ , cf. Figure 3) divisé par le nombre de poissons détectés à l'entrée de la prise d'eau ( $nb(PE)$  : antenne E) et multiplié par 100 pour l'exprimer en pourcentage :

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

Le **taux de franchissement global 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 pour Pébernat ( $nb(VT)$ ) ou par le barrage ( $nb(BARRAGE)$ ), divisé par le nombre total de poissons détectés à l'aménagement et multiplié par 100 pour l'exprimer en pourcentage :

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

### 3.2.6.3. Calculs du temps de franchissement

Pour connaître la durée du franchissement par les poissons des dispositifs de dévalaison, les temps de passage suivants ont été calculés à partir des données enregistrées au cours de l'ensemble du suivi.

Pour les 4 sites à plan de grille incliné, le **temps de franchissement par le dispositif de dévalaison** ( $T_{exu}$ ) correspond à la durée entre la première détection à l'entrée de la prise d'eau (antenne E,  $t_{1PE}$ ) et l'heure d'enregistrement du signal maximal dans le dispositif de dévalaison (antenne P (ou A),  $t_{SMax-goulotte}$ , cf. Figure 3 pour l'emplacement des antennes) :

$$T_{exu} = |t_{1PE} - t_{SMax-goulotte}|$$

Pour Pébernat, c'est l'heure d'enregistrement du signal maximal dans le canal de décharge en aval de

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

l'exutoire de dévalaison (antenne P,  $t_{SMax-décharge}$ , très peu différente de l'heure d'enregistrement à l'antenne P<sub>e</sub>, si enregistrée) qui a été utilisée **pour déterminer le  $T_{exu}$**  comme suit :

$$T_{exu} = |t_{1PE} - t_{SMax-décharge}|$$

Le **temps de franchissement par la vanne-toit** de Pébernat ( $T_{vt}$ ) correspond à la durée entre la première détection à l'antenne amont de la prise d'eau (antenne E,  $t_{1PE}$ ) et l'heure d'enregistrement du signal maximal dans le canal de décharge en aval de l'exutoire de dévalaison (antenne P,  $t_{SMax-décharge}$ ) :

$$T_{vt} = |t_{1PE} - t_{SMax-décharge}|$$

### 3.3. Suivis des conditions environnementales

#### 3.3.1. Débit de l'Ariège

Les données de débits de l'Ariège à l'amont du secteur de suivi proviennent de la station de la Banque Hydro de Foix (station n°O1252510) située 8 km environ en amont de l'aménagement de Crampagna, sans apport significatif.

#### 3.3.2. Fonctionnement des aménagements hydroélectriques

Sur chacun des sites de Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot, la société Ondulia a fourni la puissance de chaque groupe (turbine), la cote du barrage et les niveaux d'eau en amont du barrage et en aval de la centrale. Ces données permettent de calculer le débit turbiné et le débit alloué à la dévalaison (qui peut augmenter avec le débit du cours d'eau).

La télé-exploitation EDF mise en place sur le site de Pébernat a permis d'obtenir le débit turbiné horaire pour les deux hivers de suivi. En complément, une sonde de niveau à ultrasons (de marque Ijinus) a été installée en aval de la vanne-toit afin de déterminer les périodes de déversements au niveau de cette voie de franchissement.



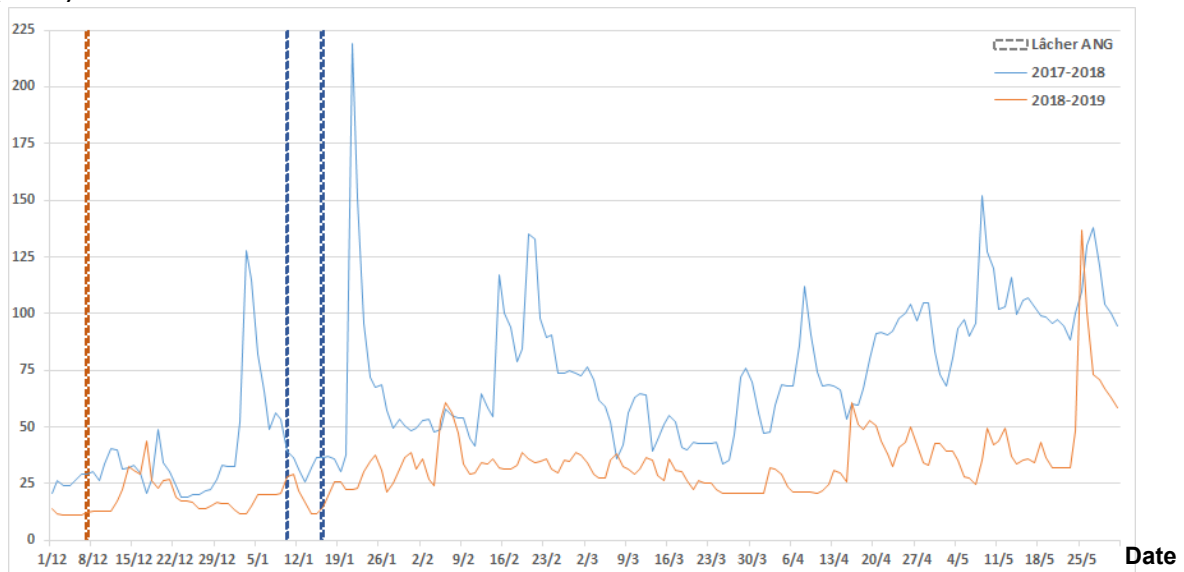
## 4. Résultats

### 4.1. Conditions environnementales

#### 4.1.1. Débits

Les deux hivers de suivi ont été très contrastés hydrologiquement (Error! Reference source not found.) : les débits de l'hiver 2017-2018 ont été très soutenus par rapport aux débits de l'hiver 2018-2019. Le débit médian sur la période du 1<sup>er</sup> décembre au 25 mai était deux fois plus élevé en 2017-2018 ( $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) qu'en 2018-2019 ( $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

QMJ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )



**Figure 5.** Débits moyens journaliers (QMJ) de l'Ariège à Foix pendant les périodes d'étude (source : Banque Hydro, station n°O1252510) – Hiver 2017-2018 en bleu, hiver 2018-2019 en orange ; débits sous forme de courbes et lâchers des anguilles sous forme de barres verticales pointillées.

#### 4.1.2. Fonctionnement des usines

Les quatre usines à plan de grille incliné ont dû être arrêtées au cours des suivis lors des forts coups d'eau transportant de nombreux corps dérivants (entre 12 et 35 jours ont vu des arrêts de turbinage selon les usines et les années). 72 passages par le barrage ont été enregistrés sur les quatre aménagements concernés, au cours des arrêts de turbinage des 21 et 22 janvier 2018. Lors des arrêts de ces usines, les vannes de garde de la prise d'eau sont fermées et empêchent tout passage par les exutoires.

L'usine de Pébernat a également cessé de turbiner à plusieurs reprises au cours des suivis (7 jours ont vu des arrêts de turbinage au cours du suivi 2017-2018 et 7 jours au cours du suivi 2018-2019). Entre janvier et février 2018, 15 anguilles ont ainsi franchi l'aménagement par la vanne-toit (13) ou l'exutoire (2) lorsque l'usine ne turbinait pas. En décembre 2018, une anguille a franchi l'aménagement de Pébernat par l'exutoire lorsque le débit turbiné était très faible, en dessous du débit d'armement de la turbine. A cette même période, deux anguilles ont franchi par l'exutoire à un faible débit turbiné ( $\sim 7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), dû à de faibles débits entrants. Dans ces conditions, le débit de l'exutoire devient très attractif.

**Tous les passages en situation d'arrêt de turbinage ou de turbinage très réduit ont été écartés pour l'évaluation de l'efficacité des dispositifs** (résultats détaillés §4.2).

## 4.2. Evaluation de l'efficacité des dispositifs de dévalaison

Les anguilles ont repris leur migration peu de temps après leur lâcher, principalement au cours d'un pic hydrologique : le premier hiver de suivi, 79% des anguilles lâchées ont migré entre le 10 et le 26 janvier 2018 (17 jours) et le second hiver de suivi, 75% des anguilles ont dévalé entre le 7 et le 22 décembre 2018 (16 jours).

### 4.2.1. Nombre d'individus détectés pour l'analyse de l'efficacité

Sur les 194 anguilles relâchées, 153 ont repris leur migration d'avalaison durant les périodes de suivi (81% en 2017-2018 ; 77% en 2018-2019) (**Error! Reference source not found.**). Au total, 617 passages ont été enregistrés sur l'ensemble des ouvrages étudiés, dont seulement 17 sans possibilité d'attribuer avec certitude une voie de franchissement (enregistrement pas suffisamment clair), pour la plupart lors de l'hiver 2017-2018 (16/17 enregistrements) : 6 sur Crampagna, 2 sur Las Rives, 2 sur Las Mijeannes, 6 sur Guilhot et 1 sur Pébernat. Malgré ces imprécisions de détection, il s'avère qu'aucun doute n'est permis quant au fait que ces poissons ne sont pas passés à travers la grille vers les turbines.

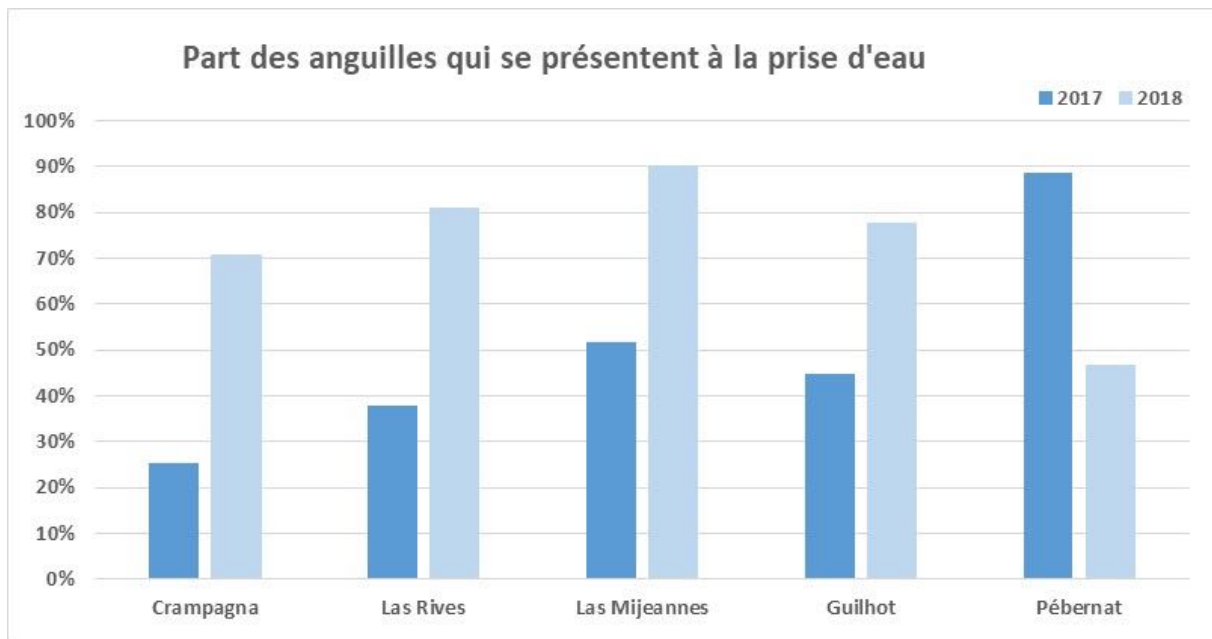
**En retirant les passages survenus au cours des arrêts de turbinage, 504 passages ont été analysés dans ce rapport.**

**Tableau 3.** Nombre d'anguilles ayant franchi chaque aménagement chaque année et dont la voie de passage a pu être attribuée (hors arrêt de turbinage).

Date du lâcher	Nb ind. lâchés	Nombre d'anguilles ayant franchi (hors arrêt de turbinage)					TOTAL
		Crampagna	Las Rives	Las Mijeannes	Guilhot	Pébernat	
01/2018	96	59	50	54	47	35	245
12/2018	98	75	63	51	40	30	259
<b>TOTAL</b>	<b>194</b>	<b>134</b>	<b>113</b>	<b>105</b>	<b>87</b>	<b>65</b>	<b>504</b>

Au cours de l'hiver 2017-2018 à l'hydrologie soutenue, entre 25% et 52% des anguilles se sont présentés aux prises d'eau des quatre aménagements à plan de grille incliné (25% à Crampagna, 38% à Las Rives, 52% à Las Mijeannes et 45% à Guilhot) (Figure **Error! Reference source not found.**). La majorité des anguilles s'est présentée au barrage. L'hiver suivant, les résultats sont inversés avec une large majorité des anguilles qui s'est présentée aux prises d'eau (71% à Crampagna, 81% à Las Rives, 90% à Las Mijeannes et 78% à Guilhot) (Figure **Error! Reference source not found.**).

Sur le site de Pébernat, les observations sont inverses : 89% des anguilles se sont présentés à la prise d'eau l'hiver 2017-2018, alors que l'hiver à l'hydrologie faible, seuls 47% se sont présentés à la prise d'eau (Figure **Error! Reference source not found.**).



**Figure 6.** Part des anguilles qui se présentent à la prise d'eau par rapport au nombre total d'anguilles ayant franchi chaque aménagement selon les sites et l'année de l'étude (hors arrêt de turbinage)

Même si un nombre important de passages a été détecté sur chaque aménagement (**Error! Reference source not found.** : 245 passages au cours du suivi 2017-2018 et 259 passages au cours du suivi 2018-2019), l'objectif de détection d'une centaine d'individus pour chaque dispositif de dévalaison n'a pas été atteint. **Cependant, les nombres d'individus se présentant à chaque prise d'eau (entre 52 et 74 individus pour les prises d'eau inclinées et 45 pour Pébernat, voir Tableau 5 ci-dessous) sont considérés comme satisfaisants et permettent une analyse fiable de leur efficacité.**

#### 4.2.2. Efficacité des prises d'eau et taux de franchissement global

Le Tableau **Error! Reference source not found.** synthétise les voies de franchissements des anguilles et les efficacités obtenues lors des deux hivers de suivi (en dehors des périodes d'arrêt d'usine).

**L'efficacité des prises d'eau  $E_f$  (%) ainsi que le taux de franchissement global  $F_r$  (%) pour les quatre prises d'eau à plan de grille incliné ont été de 100%** (aucun individu n'est passé à travers les grilles de prise d'eau, Tableau **Error! Reference source not found.**).

**Pour l'aménagement de Pébernat, au cours de l'hiver 2017-2018,** les individus qui se sont présentés au niveau de la prise d'eau lorsque l'usine turbinait ont emprunté à part quasi- égale l'exutoire (48,4% des passages) et la vanne-toit (45,2%), qui a été abaissée sur pratiquement toute la période d'étude pour évacuer l'excès de débit. Deux individus sont passés à travers la grille vers les turbines (le 19 janvier et le 15 février 2018). **La somme de l'efficacité de l'exutoire et de l'efficacité de la vanne-toit est de 93,6%.** Le **taux de franchissement** par les voies saines, qui intègre également les anguilles transitant par le barrage de Pébernat, est de **94,9% pour l'hiver 2017-2018.**

**Au cours de l'hiver 2018-2019,** une anguille présentée à la prise d'eau de Pébernat a fait demi-tour et a dévalé finalement par le barrage ; les 13 autres individus ont emprunté l'exutoire de dévalaison. La vanne-toit était complètement relevée cette année-là et n'était donc plus une voie de dévalaison possible. **L'efficacité de l'exutoire a été de 92,9%.** Le **taux de franchissement** par les voies saines s'élève quant à lui à **100% pour l'hiver 2018-2019.**

**Tableau 4.** Synthèse des voies de franchissement des anguilles et des efficacités obtenues au cours des deux hivers de suivi sur chacun des aménagements (hors période d'arrêt d'usine même partiel)

		Nb ANG ayant franchi	Nombre d'anguilles					Répartition PE/barrage	Efficacité			Tx franchissement voies saines Fr (%)
			Passées barrage nb(barrage)	Présentées PE nb(PE)	Passées turbines nb(turb)	Passées exutoire nb(exu)	Passées vanne- toit nb(vt)		Efficacité PE Ef (%)	Efficacité exu PEB Ef <sub>exu</sub> (%)	Efficacité VT PEB Ef <sub>vt</sub> (%)	
Crampagna	2017-2018	59	44	15	0	15	/	0.25	100%		100%	
	2018-2019	75	22	53	0	53	/	0.71	100%		100%	
	<b>TOTAL</b>	<b>134</b>	<b>66</b>	<b>68</b>	<b>0</b>	<b>68</b>	<b>/</b>	<b>0.51</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	
Las Rives	2017-2018	50	31	19	0	19	/	0.38	100%		100%	
	2018-2019	63	12	51	0	51	/	0.81	100%		100%	
	<b>TOTAL</b>	<b>113</b>	<b>43</b>	<b>70</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>/</b>	<b>0.62</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	
Las Mijeannes	2017-2018	54	26	28	0	28	/	0.52	100%		100%	
	2018-2019	51	5	46	0	46	/	0.90	100%		100%	
	<b>TOTAL</b>	<b>105</b>	<b>31</b>	<b>74</b>	<b>0</b>	<b>74</b>	<b>/</b>	<b>0.70</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	
Guilhot	2017-2018	47	26	21	0	21	/	0.45	100%		100%	
	2018-2019	40	9	31	0	31	/	0.78	100%		100%	
	<b>TOTAL</b>	<b>87</b>	<b>35</b>	<b>52</b>	<b>0</b>	<b>52</b>	<b>/</b>	<b>0.60</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	
Pébernat	2017-2018	35	4	31	2	15	14	0.89		48.4%	45.2%	94.9%
	2018-2019	30	16+1*	14	0	13	0	0.47		92.9%		100%
	<b>TOTAL</b>	<b>65</b>	<b>20+1</b>	<b>45</b>	<b>2</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	<b>0.69</b>		<b>62.2%</b>	<b>31.1%</b>	<b>97.2%</b>
<b>TOTAL</b>		<b>504</b>	<b>196</b>	<b>309</b>	<b>2</b>	<b>292</b>	<b>14</b>	<b>0.61</b>				

Calculs précisés au paragraphe 3.2.6.

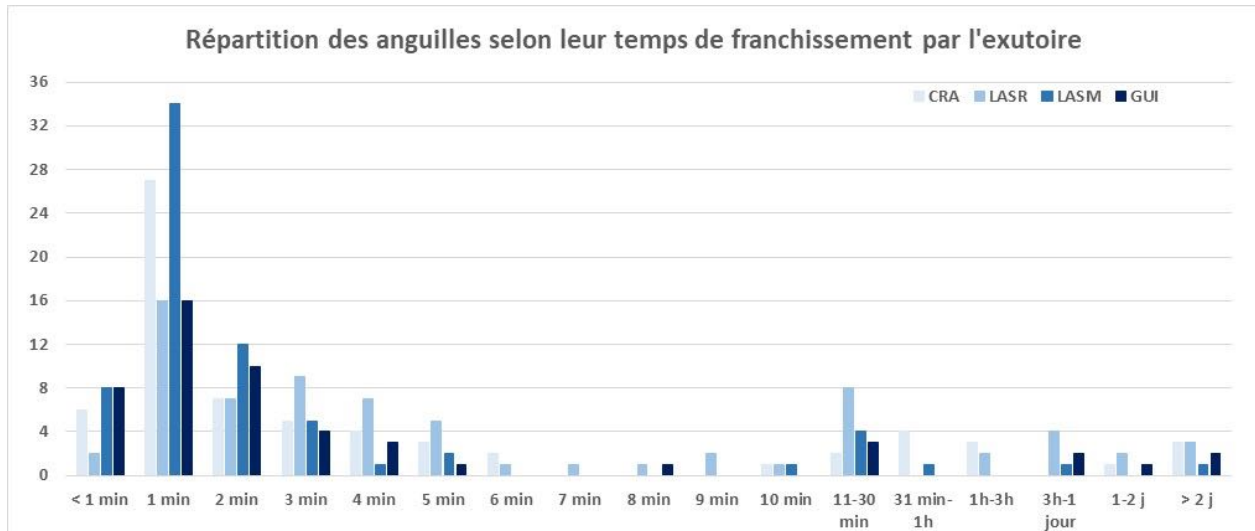
\* 16 passages directs par le barrage, plus 1 passage par le barrage après une présentation dans la prise d'eau.

### 4.2.3. Temps de franchissement

Le pas de temps des enregistreurs ATS® est à la minute ; les calculs réalisés avec les données recueillies ont donc une précision de l'ordre de la minute.

#### 4.2.3.1. Aménagements à plan de grille incliné

Le temps de franchissement des anguilles par l'exutoire ( $T_{exu}$ ) des aménagements à plan de grille incliné a pu être calculé pour 260 passages pour lesquels les données étaient disponibles.



Temps < 1 min : entrée et sortie de l'exutoire enregistrées dans la même minute aux deux antennes

**Figure 7.** Répartition des effectifs d'anguilles selon leur temps de franchissement par l'exutoire ( $T_{exu}$ ) sur les aménagements de Crampagna, Las Rives, Las Mijeannes et Guilhot

**Les  $T_{exu}$  des aménagements à plan de grille incliné ont été pour la plupart très rapides (Figure 7). 75% des anguilles ont ainsi emprunté les exutoires en moins de 5 minutes (Tableau 6) et 90% en moins de 40 minutes.** Les temps minimums sont inférieurs à la minute (9% des individus ont été détectés dans la même minute en entrée et en sortie de la prise d'eau). Les temps maximums sont assez différents selon les sites : 7,5 jours pour Las Rives, 20 jours pour Guilhot, 64 jours pour Crampagna et 73 jours pour Las Mijeannes.

**Tableau 5.** Temps de franchissement par l'exutoire ( $T_{exu}$ ) pour chaque aménagement équipé de plan de grille incliné (arrondis à la minute)

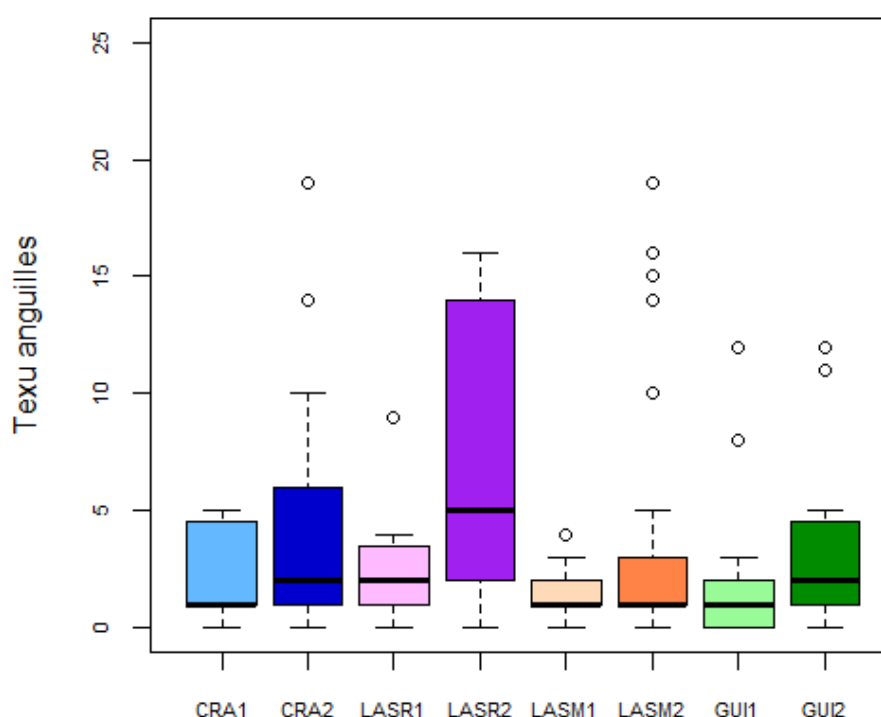
	Crampagna	Las Rives	Las Mijeannes	Guilhot	TOTAL
Nb passages	68	70	70	50	<b>259</b>
1 <sup>er</sup> quartile (min)	1	1.25	1	1	<b>1</b>
Médiane (min)	2	4	1	2	<b>2</b>
3 <sup>ème</sup> quartile (min)	5	12	2	3.5	<b>5</b>
90 <sup>ème</sup> percentile (min)	55	428	10	12	<b>38</b>
95 <sup>ème</sup> percentile (heure)	21	35	18 min	24	<b>23</b>
Max (jours)	64 jours	7,5 jours	73 jours	20 jours	

Il existe des différences de temps de franchissement entre Las Rives et les trois autres aménagements (Tableau 6). **Sur Las Rives,  $T_{exu}$  est significativement plus élevé que sur les autres sites** (test de Wilcoxon,  $p < 0.01$ ) avec une médiane à 4 minutes au lieu de 1 ou 2 minutes sur les autres sites. Aucun

autre site ne présente de différences significatives avec les autres en termes de temps de franchissement.

**Tableau 6.** P-value des tests de Wilcoxon réalisés sur les temps de franchissement  $T_{exu}$  par site (test significatif si p-value < 0,05, en gras)

	$T_{exu}$ Crampagna	$T_{exu}$ Las Rives	$T_{exu}$ Las Mijeannes	$T_{exu}$ Guilhot	Nb ANG
$T_{exu}$ Crampagna					68
$T_{exu}$ Las Rives	<b>0.009732</b>				70
$T_{exu}$ Las Mijeannes	0.05713	<b>1.72E-06</b>			70
$T_{exu}$ Guilhot	0.4767	<b>0.001357</b>	0.3037		51



**Figure 8.** Temps de franchissement par les exutoires ( $T_{exu}$ , en minutes) pour les hivers 2017-2018 (1) et 2018-2019 (2) sur les sites à plan de grille incliné (CRA : Crampagna ; LASR : Las Rives ; LASM : Las Mijeannes ; GUI : Guilhot)

Sur tous les sites à plan de grille incliné, **les  $T_{exu}$  apparaissent plus courts en 2017-2018**, l'année hydrologiquement soutenue (Figure 8). Mais cette différence est significative uniquement sur les sites de Las Rives ( $W = 296,5$ , p-value = 0.006063) et de Guilhot ( $W = 162,5$ , p-value = 0.003748).

Lorsque l'on regroupe tous les  $T_{exu}$  par année de suivi, **la différence ressort également nettement significative** ( $W = 4925,5$ , p-value = 0.00004261) **avec des  $T_{exu}$  plus élevés en 2018-2019** (3<sup>ème</sup> quartile = 9 min) que l'hiver précédent (3<sup>ème</sup> quartile = 3 min). Il est à noter que le nombre d'anguilles transitant par l'exutoire sur lequel le calcul est réalisé a été bien inférieur la première année de suivi (79) que la seconde (181) quel que soit le site.

#### 4.2.3.2. Aménagement de Pébernat

La configuration du site de Pébernat est différente (plan de grille orienté, Figure 3) et surtout, la taille de la prise d'eau est supérieure aux quatre autres sites étudiés. De ce fait, les distances entre les antennes sont plus grandes et les temps de passage calculés ne peuvent pas être comparés directement à ceux des autres sites.

Sur Pébernat, les anguilles peuvent transiter par l'exutoire ou par la vanne-toit lorsque celle-ci déverse (situation observée uniquement l'hiver 2017-2018).

**Tableau 7.** Temps de passage par année et par voie de franchissement à Pébernat

	$T_{exu}$ 2017-2018	$T_{vt}$ 2017-2018	$T_{exu}+T_{vt}$ 2017-2018	$T_{exu}$ 2018-2019	TOTAL
Nb anguilles	15	14	29	13	54
1 <sup>er</sup> quartile (min)	4	1	2	19	2
Médiane (min)	10	2	4	262 (4,4 heures)	7,5
3 <sup>ème</sup> quartile (min)	413 (6,9 h)	2,75	10	4147 (2,9 jours)	217 (3,6 h)
Max	5,5 jours	8 min	5,5 jours	102 jours	

Même si dans l'ensemble (années et voies de franchissement confondues – hormis barrage) 75% des anguilles ont franchi le site de Pébernat en moins de 3,6 heures (Tableau 7), ce résultat n'est pas représentatif d'une situation moyenne. Les temps de franchissement sont en effet très variables, aussi bien entre les deux hivers de suivi, qu'entre les voies de franchissement empruntées :

- **Le temps de franchissement a été nettement plus rapide l'hiver 2017-2018**, comme pour les sites à plan de grille incliné : **75% des individus franchissent en moins de 10 minutes en 2017-2018 contre 2,9 jours en 2018-2019**. C'est également le cas pour les temps de passage par l'exutoire, qui restent beaucoup plus faibles l'hiver 2017-2018 (75% des franchissements en moins de 6,9 heures) par rapport à l'hiver 2018-2019 (75% des franchissements en moins de 2,9 jours) ;
- Au cours de l'hiver 2017-2018, **le temps de franchissement a été nettement plus rapide par la vanne-toit** (75% des individus franchissent en moins de 3 minutes) **que par l'exutoire** (75% des individus franchissent en 6,9 heures).

**Ces différences de temps de franchissement** entre hivers et voies de franchissement sans dommage **sont toutes significatives** (Tableau 8).

**Tableau 8.** P-value des tests de Wilcoxon réalisés sur les temps de franchissement observés sur le site de Pébernat (test significatif si p-value < 0,05, en gras)

	$T_{exu}$ 2017-2018	$T_{exu}$ 2018-2019	$T_{vt}$ 2017-2018	Nb ANG
$T_{exu}$ 2017-2018				15
$T_{exu}$ 2018-2019	<b>0.04746</b>			13
$T_{vt}$ 2017-2018	<b>0.0005422</b>	<b>1.429e-05</b>		14

Enfin, sur le site de Pébernat, deux anguilles sont passées à travers la grille vers le canal d'amenée et les turbines, toutes les deux au cours de l'hiver 2017-2018 : la première en 4 minutes (entre 20h04 et 20h08 le 19/01/2018, débit turbiné de 35 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) et la seconde en 1h32 (entre 1h53 et 3h25 le 15/02/2018, débit turbiné de 38 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).



EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## 5. Discussion

L'objectif de la présente étude est **d'étudier l'efficacité pour l'anguille des prises d'eau ichtyocompatibles conformes aux préconisations de Courret et Larinier (2008)**, sur des aménagements hydroélectriques dont les débits d'équipement sont compris entre 30 et 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Cette étude est basée sur le **suivi par radio télémétrie de 194 anguilles européennes au stade argenté au droit de 5 aménagements situés en série sur l'Ariège au cours des hivers 2017-2018 et 2018-2019**. Les conditions hydrologiques ont été très différentes au cours de ces deux hivers, avec des débits médians deux fois plus soutenus durant l'hiver 2017-2018 que durant l'hiver suivant, ce qui a permis de tester les dispositifs dans des conditions hydrologiques très contrastées.

### 5.1. Migration des anguilles entre deux années hydrologiquement différentes

Les anguilles argentées utilisées au cours de ce projet provenaient d'un autre bassin. Leur capture, transport, marquage et lâcher dans une rivière différente, ont pu perturber l'instinct de migration chez certains individus. Néanmoins, les suivis menés au cours de deux hivers de dévalaison de l'anguille ont permis d'observer une centaine de passages par aménagement (504 passages au total hors arrêt de turbinage). Durant les deux périodes de suivi, le taux d'arrivée des poissons sur les sites diminue de l'amont vers l'aval, passant de 69% des anguilles lâchées arrivées à Crampagna à 34% à Pébernat (chiffres présentés Tableau 4 qui n'incluent pas les passages lors des arrêts de turbinage). Ils ont été plus élevés durant l'hiver 2017-2018 qui a bénéficié d'une plus forte hydraulité. Ces observations sont cohérentes avec d'autres suivis menés sur l'anguille européenne (Travade *et al.* 2010; Sandlund *et al.* 2017) et avec les connaissances sur la migration de dévalaison de l'espèce, qui peut être inhibée en fonction de différents facteurs environnementaux comme la baisse des débits (Haro 2003). Une hydrologie soutenue est en effet un facteur clef dans la dévalaison de l'anguille (Boubée *et al.* 2001; Acou *et al.* 2008), ce qui explique le plus grand nombre de poissons qui ont parcouru le secteur d'étude au cours de l'hiver 2017-2018.

Des arrêts de migration des anguilles ont été observés le long du secteur suivi (Tableau 3 et Tableau 4), ce qui est couramment relevé lors de suivis similaires (Gosset *et al.* 2005; Bau *et al.* 2013). Notre étude ne permet pas de déterminer la cause de ces arrêts de migration entre les sites d'étude, une mortalité liée au passage par les turbines étant écartée. Les anguilles peuvent aussi bien (i) être vivantes et leurs arrêts de migration être temporaires, ou (ii) être mortes pour une raison indéterminée (impact de la manipulation capture-transport-marquage, prédation, dommages liés au passage par les barrages et les goulottes de dévalaison malgré les soins apportés à leur conception, ou la combinaison de plusieurs facteurs...).

Les conditions hydrologiques ont fortement influencé la voie de franchissement empruntée sur les sites étudiés : les anguilles ont majoritairement franchi les 4 aménagements à plan de grille incliné par les barrages (48-75% selon les sites) durant l'hiver 2017-2018 à l'hydrologie soutenue et elles ont majoritairement franchi par les prises d'eau (71-90%) durant l'hiver 2018-2019 à l'hydrologie plus réduite (Figure 6). Pour le site de Pébernat, les observations sont inversées avec davantage de passages des anguilles par la prise d'eau lorsque les débits sont soutenus. Cela est lié à la configuration du site, avec la présence de la vanne-toit au sein de la prise d'eau qui joue le rôle d'ouvrage évacuateur prioritaire (et d'exutoire lorsqu'elle déverse).



EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## 5.2. Efficacité des prises d'eau

**L'efficacité pour l'anguille des prises d'eau à plan de grille incliné suivies dans le cadre de cette étude est de 100%** (Tableau 4). L'espacement libre entre les barreaux (20 mm) et la taille des anguilles marquées (longueur totale comprise entre 549 et 955 mm pour une moyenne de 673 mm ; largeur de la tête comprise entre 18,6 et 42,6 mm pour une moyenne de 27,5 mm) ne peuvent expliquer seuls l'efficacité de 100%. L'anguille possède en effet la capacité de traverser un espace plus étroit que la largeur de sa tête (et *a fortiori* de son corps) (Travade *et al.* 2009). Calles *et al.* (2013), reprenant les relations entre la longueur totale du corps et le franchissement des grilles définies par Travade *et al.* (2009), ont estimé que des passages à travers une grille à 20 mm sont ainsi possibles pour des anguilles de taille jusqu'à 714 mm (78% des 160 anguilles détectées aux prises d'eau au cours de la présente étude mesuraient moins de 714 mm). De tels passages ont d'ailleurs été observés *in situ* pour des anguilles de taille 680 mm (Calles *et al.* 2010). Sur les sites de l'Ariège étudiés, l'espacement inter-barreaux de 20 mm associé à l'inclinaison des grilles ont joué un rôle de barrières physique et comportementale complémentaires, qui s'est avéré très efficace pour empêcher tout passage au travers du plan de grille. De plus, les anguilles qui se sont présentées devant les plans de grille inclinés ont pour la majorité été rapidement guidées vers les exutoires de surface (Figure 8), et cela malgré le fait que cette espèce dévale essentiellement à proximité du fond (Brown 2005; Brown *et al.* 2009).

Sur le site de Pébernat, le plan de grille orienté a également joué un rôle de barrière satisfaisant puisque seuls deux individus sur les 45 qui se sont présentés au niveau de la prise d'eau ont franchi le plan de grille. Ce site possède une configuration particulière concernant les possibles voies de passage, avec la vanne-toit accolée à l'exutoire qui devient une voie de franchissement très attractive et privilégiée lorsqu'elle déverse. **L'efficacité pour l'anguille de l'exutoire et de la vanne-toit de Pébernat est évaluée à 93,6% pour l'hiver 2017-2018 et 92,9% pour l'hiver 2018-2019.**

Les deux anguilles qui ont transité par les turbines de l'usine de Pébernat au cours de l'hiver 2017-2018 ont une longueur totale respectivement de 575 et 630 mm pour une largeur de tête respectivement de 24,35 et 23,73 mm. La grille de prise d'eau de Pébernat présente une vitesse normale moyenne de 0,48 m.s<sup>-1</sup> pour le débit maximum turbiné, de peu inférieure à la valeur moyenne maximale préconisée de 0,5 m.s<sup>-1</sup> (Courret et Larinier 2008), en lien avec les contraintes d'implantation au niveau du site. Durant les périodes de suivi, cette grille a subi périodiquement un colmatage très important, le dégrilleur ne nettoyant que partiellement la grille (pour mémoire, la surface immergée de la grille est de 105 m<sup>2</sup>). Ce phénomène a pu engendrer des hétérogénéités de l'écoulement, qui se sont traduites localement par de fortes vitesses d'approche favorisant l'entraînement des anguilles à travers la grille (même si l'usine ne turbinait pas à son plein régime à ce moment-là, mais à 38 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

**Sur les cinq sites suivis, les critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles permettent d'atteindre une très bonne efficacité de franchissement pour l'anguille.**

## 5.3. Temps de franchissement

### 5.3.1. Aménagements à plan de grille incliné

**Sur les 4 aménagements à plan de grille incliné, globalement 75% des individus empruntent l'exutoire en moins de 5 minutes et 90% en moins de 40 minutes** (Tableau 5). Des temps de franchissement de quelques minutes ont également été observés par Calles *et al.* (2013) sur un dispositif de conception proche de ceux étudiés.

Sur le site de Las Rives, les temps de franchissement apparaissent significativement plus élevés que sur les autres sites, sauf pour la valeur maximale (Tableau 6). Les écarts sont très faibles sur les valeurs

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

du 1<sup>er</sup> quartile et de la médiane (médiane de 4 minutes à Las Rives contre 1 à 2 minutes sur les autres sites ; Tableau 5). Ils sont en revanche plus importants sur les valeurs du 3<sup>ème</sup> quartile (12 minutes contre 2 à 5 minutes) et du 90<sup>ème</sup> percentile (428 minutes contre 10 à 55 minutes). Ces résultats sur les temps de franchissement des anguilles entre les sites à plan de grille incliné sont à l'inverse de ceux obtenus pour les smolts de saumon atlantique, pour lesquels c'est le site de Las Rives qui présente la plus forte probabilité de franchissement sans hésitation (Frey *et al.* 2020). Cela pourrait s'expliquer par les différences de comportement entre les deux espèces au cours de leur dévalaison, les anguilles dévalant essentiellement à proximité du fond (Brown 2005; Brown *et al.* 2009), contrairement au smolts qui dévalent dans les 2 à 3 premiers mètres de profondeur sous la surface de l'eau (Hesthagen et Garnås 1986; Rivinoja 2005). Par conséquent, les anguilles peuvent avoir un comportement de prospection au fond avant de rejoindre les exutoires de surface contrairement aux smolts. Les prises d'eau les plus profondes demandent également plus de temps de nage des anguilles le long de la grille pour rejoindre les exutoires de surface. Ces hypothèses apparaissent comme les plus probables pour expliquer les temps de franchissement des anguilles plus longs à Las Rives par rapport aux 3 autres sites et les différences par rapport aux résultats obtenus pour les smolts. Parmi les 4 aménagements à plan de grille incliné étudiés, Las Rives présente en effet une prise d'eau bien plus profonde que les 3 autres (4,18 m contre entre 2,58 et 2,65 m), avec des exutoires moins profonds (0,5 m contre entre 0,63 à 0,70 m). La profondeur d'exutoire de Las Rives représente ainsi 12% de celle de la prise d'eau, contre 24,2% à 27,1% sur les 3 autres prises. Le site de Las Rives présente également la particularité d'avoir un sommet de grille obturé sur la même profondeur que les exutoires, de manière à générer des courants transversaux guidant les poissons vers les exutoires. Cette différence de conception explique probablement les temps de franchissement des smolts plus courts à Las Rives que sur les autres sites (Frey *et al.* 2020) et il est probable que cela s'avère également favorable au guidage des anguilles, une fois celles-ci arrivées au sommet du plan de grille. Seuls des suivis de la trajectométrie 3D des poissons au sein des prises d'eau permettraient toutefois de confirmer ou infirmer ces hypothèses.

Tous sites confondus, les temps de franchissement ont été plus élevés en 2018-2019 (3<sup>ème</sup> quartile = 9 min) que l'hiver précédent (3<sup>ème</sup> quartile = 3 min). Ces résultats pourraient être liés à l'hydrologie plus favorable en 2017-2018, comme observé chez les smolts de saumon atlantique (Frey *et al.* 2020). Des analyses complémentaires seront nécessaires pour identifier précisément les facteurs explicatifs des temps de franchissement (débit turbiné, débit de l'exutoire, perte de charge...).

### 5.3.2. Aménagement de Pébernat

Le temps de franchissement des anguilles est plus long sur l'aménagement de Pébernat que sur les autres sites (Tableau 7 vs Tableau 5). Ce résultat est lié à la plus grande taille du site (distance supérieure entre les antennes de détection) et à la conception de la prise d'eau qui demande plus de temps de prospection aux poissons pour trouver l'exutoire.

Comme pour les autres sites, le temps de franchissement de Pébernat est nettement plus rapide durant l'hiver 2017-2018. Cet hiver-là, l'hydrologie a été soutenue, la vanne-toit était régulièrement ouverte et a permis un franchissement rapide de l'ouvrage par les anguilles.

Le temps de franchissement est nettement plus rapide par la vanne-toit que par l'exutoire (observation uniquement pour l'hiver 2017-2018 pour lequel on détecte des passages par la vanne-toit et par l'exutoire). Cela est lié aux différences de taille et de débit transité entre ces 2 organes : 2 m de largeur et 2 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> pour l'exutoire, contre 17 m de largeur et plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> pour la vanne-toit.

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICHTYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## 5.4. Mise en perspective avec les travaux antérieurs

Klopries *et al.* (2018) ont récemment synthétisé certaines études qui se sont intéressées à l'efficacité des dispositifs de dévalaison de différents types pour l'anguille. Pour cette espèce, l'efficacité reportée dans les études est bien plus basse que pour les autres espèces, avec une moyenne à 17% et un maximum à 27%. Le défaut d'efficacité est souvent lié à un espacement libre entre les barreaux des grilles trop important pour arrêter efficacement les anguilles et les inciter à rechercher une voie de passage alternative (exutoire ou ouvrage évacuateur). En effet, Gosset *et al.* (2005) et Travade *et al.* (2010), ont constaté des taux encore significatifs de passage des anguilles au travers de plans de grille même avec un espacement de 30 mm. Sur ce point, la présente étude sur cinq sites permet de confirmer l'intérêt d'un espacement libre entre barreaux de 20 mm, couplé à l'inclinaison ou l'orientation des plans de grille, pour arrêter des anguilles de plus de 550 mm (anguilles argentées femelles).

Les dispositifs testés sont dotés uniquement d'exutoires de surface. Concernant la conception des exutoires de dévalaison pour l'anguille, la plupart des recommandations actuelles suggèrent une meilleure efficacité des exutoires de fond par rapport à des exutoires de surface (Fjeldstad *et al.* 2018; Schwevers et Adam 2020). Pour autant, aucune difficulté particulière n'a été détectée au cours de notre étude puisqu'entre 62,2% (pour Pébernat) et 100% (pour les 4 sites à plan de grille incliné) des anguilles qui se présentent à la prise d'eau (hors arrêt de turbinage) empruntent les exutoires de surface, la majorité avec un temps de franchissement très court. Les résultats d'efficacité entre les exutoires de fond et ceux de surface, reportés dans les études précédentes, sont assez variables d'un site à l'autre : Gosset *et al.* (2005) observent que des exutoires de fond sont trois à quatre fois plus efficaces que les exutoires de surface (prise d'eau à grille orientée, associée à un espacement inter-barreaux de 30 mm) tandis que Travade *et al.* (2010) mentionnent une efficacité très faible des exutoires de fond (2,6%) par rapport aux exutoires de surface (17,5% et 21,6 %) avec un plan de grille similaire (grille orientée, espacement inter-barreaux de 30 mm) mais des exutoires de fond différents. D'autre part, il apparaît que les anguilles semblent capables de prospecter la colonne d'eau lorsqu'elles sont arrêtées par un plan de grille (Brown 2005; Brown *et al.* 2009). Enfin, les exutoires de fond peuvent poser des problèmes d'entretien, liés à leur obstruction, pénalisant alors leur efficacité. La configuration avec un plan de grille incliné à 26° par rapport à l'horizontale apparaît tout à fait efficace pour guider les anguilles vers les exutoires de surface, à condition que l'espacement inter-barreaux joue le rôle de barrière physique. Plusieurs études ont ainsi montré des efficacités satisfaisantes des exutoires de surface associés à un plan de grille incliné (100% pour Therrien et Verreault 1998; 82% pour Calles *et al.* 2013). Les résultats de la présente étude vont dans ce sens, avec une efficacité de 100% pour les quatre prises d'eau équipées d'un plan de grille incliné.

Dans la configuration d'un plan de grille orienté, les anguilles ne sont pas guidées verticalement vers la surface, ce qui peut en partie expliquer les résultats variables des exutoires de surface pour l'anguille selon les sites (Gosset *et al.* 2005; Travade *et al.* 2010). Cela amène à s'interroger sur la profondeur minimale des exutoires à adopter compte tenu de la hauteur d'eau au droit de la grille, afin de garantir une bonne efficacité pour cette espèce. A Pébernat, la profondeur de l'exutoire est de 0,70 m et représente environ 30-35% de la profondeur de la prise d'eau (de l'ordre de 2,0-2,5 m). Les performances de cet exutoire sont tout à fait intéressantes en termes d'efficacité, mais pas encore optimales au regard des temps de passage pouvant rester élevés pour une partie des anguilles (3<sup>ème</sup> quartile à 2,9 jours durant l'hiver 2018-2019). Toutefois, ces performances sont possiblement un peu pénalisées par le positionnement de l'exutoire à environ 6 m du coin aval de la grille (distance impossible à réduire sur ce site, la conception ayant dû s'appuyer sur l'aménagement existant), avec une courantologie instable dans cette zone (Frey *et al.* 2020). Il est ainsi délicat d'en tirer des conclusions sur le caractère suffisant ou non des dimensions de l'exutoire. Il pourra être intéressant à l'avenir de

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

comparer les performances des exutoires de dévalaison pour l'anguille associés à des plans de grille orientés à 20 mm, pour préciser les recommandations sur leur positionnement, leurs dimensions minimales et leur alimentation en débit.

## 5.5. Conclusions et perspectives

En complément des quatre sites déjà évalués par Tomanova *et al.* (2018a) et des retours d'expériences acquis à l'étranger (Calles *et al.* 2010; Calles *et al.* 2013), **les résultats du projet EFFIGRI (Frey *et al.* 2020 et la présente étude) valident les critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles préconisés en France (Courret et Larinier 2008; Courret *et al.* 2015). Ces résultats confirment l'intérêt de ces dispositifs pour réduire très efficacement les risques d'entraînement des poissons dans les prises d'eau des aménagements hydroélectriques de petite et moyenne tailles (jusqu'à 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), à la fois pour les smolts de saumon atlantique (efficacité de 80-100%) et pour les anguilles argentées (efficacité de 93-100%).** L'atteinte de bonnes efficacités pour ces 2 espèces, de morphologies et comportements très différents, laisse espérer que ces dispositifs de dévalaison soient également efficaces pour un large spectre d'espèces holobiotiques (pour des individus de tailles supérieures ou égales à la taille des smolts testés soit entre 159 et 190 mm), bien que ceci reste à confirmer. Comme cela a été précisé par ailleurs (Frey *et al.* 2020), malgré ces très fortes efficacités, les faibles impacts résiduels observés (mortalités, retards) au niveau des aménagements hydroélectriques peuvent néanmoins engendrer des impacts cumulés significatifs à l'échelle des axes de migration très fortement équipés.

Concernant les données acquises sur l'anguille dans le cadre du projet EFFIGRI, des analyses plus poussées restent à mener pour notamment :

- Identifier les déterminants de la répartition des anguilles (passage par surverse au barrage ou par la prise d'eau). Les résultats pourraient être confrontés à ceux obtenus notamment par Bau *et al.* (2013).
- Identifier les facteurs qui influencent le temps de franchissement des anguilles par l'exutoire (débit turbiné, débit de l'exutoire, perte de charge, ...).

Jusqu'à présent en France, des prises d'eau ichtyocompatibles ont été installées pour des débits turbinés jusqu'à environ 100 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Pour les smolts, les 8 sites testés par Tomanova *et al.* (2018a) et dans le cadre du projet EFFIGRI (Frey *et al.* 2020) présentent des débits d'équipement entre 4 et 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Pour les anguilles argentées, les 5 sites testés dans le cadre du projet EFFIGRI (présente étude) ont des débits d'équipement compris entre 28 et 50 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Un certain nombre de résultats issus de tests effectués sur des prises d'eau de plus grande taille, équipées de dispositifs de conceptions proches des préconisations de Courret et Larinier (2008), sont par ailleurs disponibles :

- A la centrale de Baigts sur le Gave de Pau turbinant 90 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> et équipée d'un plan de grille orienté dans le prolongement de la berge rive droite, avec un espacement libre entre barreaux de 30 mm à l'époque des tests (réduit à 20 mm aujourd'hui) et d'un exutoire de surface transitant 2,2 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Une efficacité de 92% a été mesurée en 2001 pour les smolts de saumon atlantique, la répulsivité du plan de grille pour ces poissons et leur guidage étant renforcés par un masque de surface de 2,0 m de profondeur (Chanseau *et al.* 2002). En 2006-2007, un test a été conduit en sélectionnant spécifiquement de très grandes anguilles (840 mm en moyenne) dont 76% présentaient une largeur de tête supérieure à l'espacement libre entre barreaux de 30 mm et étaient donc *a priori* physiquement bloquées. Parmi ces anguilles, 68% ont franchi l'aménagement par les ouvrages évacuateurs qui jouxtent la prise d'eau, 24% par l'exutoire de surface et plus que 8% par les turbines, contre plus de 50% pour cette dernière voie de passage

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

durant les 2 hivers précédents pour des anguilles de 610 et 640 mm de tailles moyennes (Travade *et al.* 2010).

- A la centrale d'Atrafors sur la rivière Atran en Suède, turbinant  $72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et équipée d'un plan de grille incliné à  $35^\circ$  avec un espacement libre entre barreaux de 18 mm et de 6 exutoires-pièges positionnés en sub-surface. Une efficacité de 82% pour les anguilles argentées y a été mesurée en 2008 (Calles *et al.* 2013).

Compte tenu de la constance des efficacités obtenues pour des débits d'équipement entre 4 et  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et des résultats déjà existants sur des prises d'eau de plus grande taille, on peut être confiant quant à l'efficacité des prises d'eau ichtyocompatibles pour des débits turbinés jusqu'à environ  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Néanmoins, des questions peuvent perdurer, notamment sur l'emplacement des exutoires et le débit à y faire transiter. Au vu des investissements que ces dispositifs nécessitent, il demeure donc intéressant de vérifier les efficacités et les temps de passage obtenus pour les smolts et les anguilles argentées au niveau de prises d'eau de  $80\text{-}100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , notamment pour les anguilles dont les temps pour trouver des exutoires de surface semblent susceptibles d'augmenter avec la profondeur des prises d'eau.

Les prises d'eau ichtyocompatibles, en filtrant davantage de corps dérivant du fait des espacements libres entre barreaux réduits, peuvent générer des difficultés d'exploitation. Si elles ne sont pas équipées d'un dispositif de nettoyage efficace, elles peuvent entraîner des pertes de charge importantes, voire une réduction du débit maximal entonné, comme cela est observé sur le site de Pébernat. Pour aller au-delà des premiers éléments qualitatifs recueillis dans le cadre de l'enquête portée par France Hydroélectricité (France Hydro Electricité 2020), il serait nécessaire d'acquérir un retour d'expérience chiffré sur les pertes de charge, les sollicitations des systèmes de dégrillage et les besoins d'intervention sur plusieurs prises d'eau et au cours de différentes saisons.

Par ailleurs, pour limiter au maximum les difficultés d'exploitation, 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 barreaux et des supports profilés (Raynal *et al.* 2013a; Raynal *et al.* 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 la durée du cycle complet de dégrillage soit suffisamment courte (<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 associées (Raynal *et al.* 2013a; Raynal *et al.* 2014; Meister *et al.* 2020; Lemkecher *et al.* 2021).



EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

## 6. Références

- Acou, A., P. Laffaille, A. Legault and E. Feunteun (2008). "Migration pattern of silver eel (*Anguilla anguilla*, L.) in an obstructed river system." *Ecology of Freshwater Fish* **17**(3): 432-442.
- Bau, F., P. Gomes, P. Baran, H. Drouineau, M. Larinier, A. Alric, F. Travade and E. De Oliveira (2013). Suivi par radiopistage de la dévalaison de l'anguille argentée sur le gave de Pau au niveau des ouvrages hydroélectriques d'Artix, Biron, Sapso, Castetarbe, Baigts et Puyoo (2007-2010). Rapport de synthèse, Rapport Onema/EDF – Programme R&D Anguilles/Ouvrage.
- Boubée, J. A., C. P. Mitchell, B. L. Chisnall, D. W. West, E. J. Bowman and A. Haro (2001). "Factors regulating the downstream migration of mature eels (*Anguilla* spp.) at Aniwhenua Dam, Bay of Plenty, New Zealand." *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **35**(1): 121-134.
- Brown, L., A. Haro and T. Castro-santos (2009). "Three-Dimensional Movement of Silver-Phase American Eel in the Forebay of a Small Hydroelectric Facility." *American Fisheries Society Symposium* **58**: 277-291.
- Brown, L. S. (2005). Downstream passage behavior of silver phase american eels at a small hydroelectric facility, University of Massachusetts Amherst.
- Calles, O., S. Karlsson, P. Vezza, C. Comoglio and J. Tielman (2013). "Success of a low-sloping rack for improving downstream passage of silver eels at a hydroelectric plant." *Freshwater Biology* **58**(10): 2168-2179.
- Calles, O., I. C. Olsson, C. Comoglio, P. S. Kemp, L. Blunden, M. Schmitz and L. A. Greenberg (2010). "Size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea." *Freshwater Biology* **55**(10): 2167-2180.
- Chanseau, M., O. Barriere and F. Travade (2002). Etude de la migration de dévalaison des juvéniles de saumon Atlantique (*Salmo salar*) au niveau des aménagements hydroélectriques de Castetarbe, Baigts-de-Béarn et Puyoo sur le Gave de Pau en 2001, EDF R&D, : 61 p.
- Courret, D. and M. Larinier (2008). Guide pour la conception de prises d'eau Ichtyocompatibles pour les petites centrales hydroélectriques, GHAAPPE 78.
- Courret, D., M. Larinier, L. David and 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 (Pays-Bas).
- Durif, C. M. F. and P. Elie (2008). "Predicting downstream migration of silver eels in a large river catchment based on commercial fishery data." *Fisheries Management and Ecology* **15**(2): 127-137.
- Fjeldstad, H.-P., U. Pulg and T. Forseth (2018). "Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions." *Marine and Freshwater Research* **69**(12): 1834-1847.
- France Hydro Electricité (2020). Enquête sur les prises d'eau ichtyocompatibles des centrales hydroélectriques - Synthèse France Hydro Electricité SEPTEMBRE 2020 (version 1),.
- Frey, A., S. Tomanova, O. Mercier, D. Courret, S. Tetard, L. Tissot, V. Mataix and T. Lagarrigue (2020). Etude d'efficacité de prises d'eau ichtyocompatibles pour des smolts de saumon atlantique - Projet EFFIGRI.
- Gomes, P. and M. Larinier (2008). Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan. Etablissement de formules prédictives. : 76 p.
- Gosset, C., F. Travade, C. Durif, J. Rives and P. Elie (2005). "Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant." *River Research and Applications* **21**(10): 1095-1105.
- Haro, A. (2003). Downstream Migration of Silver-Phase Anguillid Eels. *Eel Biology*. K. Aida, K. Tsukamoto and K. Yamauchi. Tokyo, Springer Japan: 215-222.
- Hesthagen, T. and E. Garnås (1986). "Migration of Atlantic Salmon Smolts in River Orkla of Central Norway in Relation to Management of a Hydroelectric Station." *North American Journal of Fisheries Management* **6**(3): 376-382.
- Klopries, E.-M., Z. D. Deng, T. U. Lachmann, H. Schüttrumpf and 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**(12): 1882-1893.
- Larinier, M. and F. Travade (1999). "La dévalaison des migrants : problèmes et dispositifs." *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture* **353/354**: 181-210.
- Lemkecher, F., L. Chatellier, D. Courret and L. David (2020). "Contribution of Different Elements of

EDF R&D	ETUDE D'EFFICACITE DE PRISES D'EAU ICTHYOCOMPATIBLES POUR L'ANGUILLE EUROPEENNE - PROJET EFFIGRI -	6125-3313-2020-00368-FR Version 1.0
---------	--	--

- Inclined Trash Racks to Head Losses Modeling." *Water* **12**(4): 966.
- Lemkecher, F., L. Chatellier, D. Courret and L. David (2021). "Experimental study of fish-friendly angled bar racks with horizontal bars." *Journal of Hydraulic Research*: 1-12.
- Meister, J., H. Fuchs, C. Beck, I. Albayrak and R. M. Boes (2020). "Velocity Fields at Horizontal Bar Racks as Fish Guidance Structures." *Water* **12**(1): 280.
- Raynal, S., L. Chatellier, D. Courret, M. Larinier and L. David (2013a). "An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 2. Angled trashracks." *Journal of Hydraulic Research* **51**(1): 67-75.
- Raynal, S., L. Chatellier, D. Courret, M. Larinier and L. David (2014). "Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks." *Journal of Hydraulic Research* **52**(3): 426-431.
- Raynal, S., L. Chatellier, L. David, D. Courret and 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 Ecohydraulique.
- Raynal, S., L. Chatellier, L. David, D. Courret and 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 Ecohydraulique.
- Raynal, S., D. Courret, L. Chatellier, M. Larinier and L. David (2013c). "An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 1. Inclined trashracks." *Journal of Hydraulic Research* **51**(1): 56-66.
- Righton, D., H. Westerberg, E. Feunteun, F. Økland, P. Gargan, E. Amilhat, J. Metcalfe, J. Lobon-Cervia, N. Sjöberg, J. Simon, A. Acou, M. Vedor, A. Walker, T. Trancart, U. Brämick and K. Aarestrup (2016). "Empirical observations of the spawning migration of European eels: The long and dangerous road to the Sargasso Sea." *Science Advances* **2**(10): e1501694.
- Rivinoja, P. (2005). *Migration Problems of Atlantic Salmon (Salmo salar L.) in Flow Regulated Rivers*. 2005.
- Sandlund, O. T., O. H. Diserud, R. Poole, K. Bergesen, M. Dillane, G. Rogan, C. Durif, E. B. Thorstad and L. A. Vøllestad (2017). "Timing and pattern of annual silver eel migration in two European watersheds are determined by similar cues." *Ecology and Evolution* **7**(15): 5956-5966.
- Schwevers, U. and B. Adam (2020). *Fish Protection Technologies and Fish Ways for Downstream Migration*.
- Therrien, J. and G. Verreault (1998). Evaluation d'un dispositif de dévalaison et des populations d'anguilles en migration dans la rivière Rimouski, Ministère de l'Environnement et de la faune, Direction régionale de Bas-Saint-Laurent, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune et Groupe-conseil Génivar inc.,: 37 p.
- Tomanova, S., D. Courret and 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*(1): 11-13.
- Tomanova, S., D. Courret, A. Alric, E. De Oliveira, T. Lagarrigue and S. Tétard (2018a). Etude d'efficacité des exutoires associés à des grilles inclinées ou orientées pour la dévalaison des smolts de saumon atlantique, AFB-IMFT-EDF-ECOGEA: 49.
- Tomanova, S., D. Courret, A. Alric, E. De Oliveira, T. Lagarrigue and 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.
- Tomanova, S., D. Courret, S. Richard, P. A. Tedesco, V. Mataix, A. Frey, T. Lagarrigue, L. Chatellier and S. Tétard (2021). "Protecting the downstream migration of salmon smolts from hydroelectric power plants with inclined racks and optimized bypass water discharge." *Journal of Environmental Management* **284**: 112012.
- Travade, F., M. Larinier, S. Subra, P. Gomes and E. De-Oliveira (2010). "Behaviour and passage of European silver eels (*Anguilla anguilla*) at a small hydropower plant during their downstream migration." *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*(398): 01.
- Travade, F., M. Larinier, S. Subra, P. Gomes and E. De Oliveira (2009). Franchissement des aménagements hydroélectriques par l'anguille argentée en dévalaison - Etudes des voies de franchissement de l'usine hydroélectrique de Baigts-de-Béarn (64) - Test d'exutoires de dévalaison et de grilles fines, EDF R&D - GHAAPPE: 72 p.