

## Etude d'efficacité des exutoires associés à des grilles inclinées ou orientées pour la dévalaison des smolts de saumon atlantique



### ETUDES 2016 ET SYNTHÈSE DES RESULTATS 2015-2016

S. Tomanova, D. Courret, A. Alric, E. De-Oliveira, T. Lagarrigue, S. Tétard

2018

Avec la collaboration de :

**CAM ENERGIE**  
SOCIETE HYDROELECTRIQUE DE GOTEIN  
EDF – Unité de Production Sud Ouest

Avec le soutien de :

**MI.GA.DO**  
Délégation interrégionale Sud-Ouest de l'ONEMA, Unité Spécialisé Migrateur Adour de l'ONEMA  
Syndicat Mixte de Production d'Auterive  
Institut P' de Poitiers  
AAPPMA du Gave d'Oloron

- **AUTEURS**

**Sylvie TOMANOVA\***

(AFB - Pôle Ecohydraulique AFB-IMFT, Toulouse), [sylvie.tomanova@afbiodiversite.fr](mailto:sylvie.tomanova@afbiodiversite.fr)

**Dominique COURRET\***

(AFB - Pôle Ecohydraulique AFB-IMFT, Toulouse), [dominique.courret@afbiodiversite.fr](mailto:dominique.courret@afbiodiversite.fr)

**Alain ALRIC**

(AFB - Pôle Ecohydraulique AFB-IMFT, Toulouse), [alain.alric@afbiodiversite.fr](mailto:alain.alric@afbiodiversite.fr)

**Eric DE OLIVEIRA**

(EDF R&D - LNHE, Chatou), [eric.de-oliveira@edf.fr](mailto:eric.de-oliveira@edf.fr)

**Thierry LAGARRIGUE**

(ECOGEA, Muret), [thierry.lagarrigue@ecogea.fr](mailto:thierry.lagarrigue@ecogea.fr)

**Stéphane TETARD\***

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

\*CORRESPONDANTS

- **REMERCIEMENTS :**

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

**CAM Energie**, Mr Birou (responsable secteur EnR) pour la mise à disposition du site de la centrale d'Auterrive, ainsi que Mr Poeydomenge (gardien de la centrale) pour sa disponibilité sur site.

**Société hydroélectrique de Gotein**, Mr Pourillou (propriétaire) pour la mise à disposition des sites de Gotein et Trois-Villes, ainsi que Mr Bidegainberry (gardien des centrales) pour sa disponibilité sur site.

**EDF GU de Baigts Asasp**, Mme Hamard (cadre d'exploitation) pour nous avoir permis la réalisation de l'étude sur le site d'Halsou, ainsi que M Largete (technicien) pour sa disponibilité sur le site.

**MIGADO** pour l'accueil dans leurs locaux, la fourniture et le transport des poissons.

L'**Unité Spécialisé Migrateur Adour de l'AFB** et la **Direction Interrégionale Sud-Ouest de l'AFB** pour leur participation à la préparation et à la réalisation des tests.

L'**AAPPMA du Gave d'Oloron** pour le prêt et le transport des cuves de stabulation des poissons.

Le **Syndicat Mixte de Production d'eau d'Auterrive** pour la mise à disposition du terrain et de leurs locaux pour la stabulation et le marquage des poissons en 2015.

L'**Institut P' de Poitiers** pour leur participation à la réalisation des tests.

## Résumé

A partir des retours d'expérience acquis en France et à l'étranger sur l'efficacité de différentes configurations d'exutoires associés à des plans de grilles, les bases de conception et de dimensionnement des "prises d'eau ichtyocompatibles", visant à atteindre de fortes efficacités de passage des poissons dévalant (> 90 %), ont été définies en 2008. Depuis, de nombreux aménagements ont pu être équipés de ces dispositifs visant à protéger les poissons en migration et il demeure aujourd'hui nécessaire de valider *in situ* ces nouvelles configurations et vérifier si les plus hautes efficacités sont bien atteintes.

En 2015, le pôle Ecohydraulique de l'Onema (actuellement Agence française pour la biodiversité) a réalisé une première étude sur la centrale hydroélectrique d'Auterrive (Gave d'Oloron) pour évaluer l'efficacité d'un dispositif de dévalaison pour les smolts de saumon atlantique : plan de grille incliné associé à un exutoire et canal de transfert. En 2016, en collaboration avec le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF et le bureau d'études Ecogea, cette étude a été poursuivie sur trois autres sites : la centrale hydroélectrique d'Halsou sur la Nive et les centrales de Trois-Villes et de Gotein sur le Saison.

Les 4 centrales hydroélectriques étudiées sont de petite à moyenne taille (débit turbiné au moment des tests de 3.9 à 23.8 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Trois des sites sont équipés d'un plan de grille incliné à 26° par rapport à l'horizontale (Auterrive, Trois-Villes, Gotein), et un d'un plan de grille orienté à 25° par rapport à l'écoulement dans le prolongement d'une berge (Halsou). Les débits d'alimentation du ou des exutoires représentent entre 5.1 % et 6.4 % des débits turbinés durant les tests. L'efficacité des dispositifs de dévalaison a été évaluée par le marquage-détection (technologie RFID) de smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) issus d'élevage. Tous les dispositifs ont été testés avec le même protocole d'étude en utilisant des poissons de tailles comparables (taille moyenne de 185 mm). Entre 239 et 338 smolts marqués ont été relâchés en 5-6 lots à proximité de chaque usine. Leur passage a été suivi par des antennes RFID, installées dans toutes les voies de dévalaison possibles à l'exception des turbines, pour des raisons techniques d'installation. L'efficacité mesurée est ainsi une efficacité minimale, l'entraînement dans les turbines n'étant pas mesuré directement.

En moyenne par site, tous les tests montrent une efficacité minimale de passage par l'exutoire de dévalaison supérieure à 80 % (min – max : 80.7 – 87.5 %). On observe une certaine variabilité en fonction des lots testés, mais l'efficacité n'est jamais inférieure à 70 % (min – max des lots de test : 71.2 – 100 %). En y ajoutant les quelques passages détectés par les autres voies possibles de dévalaison saine sur les sites d'étude (passe à poissons, canal de décharge), on obtient un taux de transfert moyen entre 82.9 et 92.3 % (min – max des lots de test : 72 – 100 %).

Sur tous les sites, les poissons franchissant par les exutoires et le canal de transfert sont de taille légèrement supérieure à ceux qui n'ont pas été détectés et donc supposés passés au travers de la grille menant vers les turbines. Cette différence est statistiquement significative sur deux des quatre sites testés. Par conséquent, différents calculs d'efficacité ont été réalisés pour des sous-échantillons de smolts plus petits, mieux comparables aux tailles des smolts de certaines populations sauvages de saumon atlantique. En retenant uniquement les poissons de taille inférieure à 187.3 mm, on obtient des efficacités de passage par l'exutoire légèrement plus faibles, mais toujours supérieures à 74 % (entre 74.8 et 87.3 %), avec une différence de 3.4% en moyenne (min - max : 0.3 - 6.1 %).

La médiane du temps de passage (temps entre le lâcher et le franchissement de l'ouvrage par le dispositif de dévalaison) est entre 20min et 1h03min selon les sites (le 3<sup>ème</sup> quartile se situe entre 1h08min et 3h16). Une variabilité du temps de passage en fonction du moment de lâcher est

toutefois observée. Sur trois des quatre sites, les temps de passage sont bien plus élevés pour les lots lâchés le soir en comparaison de ceux lâchés de nuit. Les résultats sur les temps de passage des lots déversés le soir peuvent être influencés par une moindre activité diurne des poissons puisque les tests ont été effectués au début de la période de dévalaison.

Les estimations des taux survie globaux à l'échelle des aménagements hydroélectriques ont été actualisées en tenant compte des efficacités mesurées dans la présente étude. A l'échelle des aménagements, les survies des smolts en dévalaison sont ainsi de quasi 100% à Auterrive, 99.2% à Trois-Villes, et 98.7 à Gotein et 98.2% à Halsou. Dans l'hypothèse où les 4 centrales étudiées seraient en série sur un axe de migration, la survie des poissons dévalant depuis l'amont serait de 83% avant, et de 96% après améliorations des dispositifs de dévalaison.

En conclusion, l'efficacité des dispositifs de dévalaison constitués d'une grille avec un espacement entre les barreaux de 20 mm, associée à un ou plusieurs exutoires avec des débits représentant entre 5.0 % et 6.4 % des débits turbinés, est satisfaisante pour les smolts de saumon atlantique sur les quatre sites testés, compte tenu des valeurs élevées obtenues (> 80 %) et de leur caractère relativement stable selon les sites, selon les différents lots de poissons et selon les sous-échantillons de smolts de plus petites tailles. Ces résultats apportent du crédit aux critères de conception des prises d'eau ichtyocompatibles proposés par Courret et Larinier (2008) et Raynal et al. (2013). Il est à présent nécessaire de poursuivre l'acquisition de retours d'expérience sur des prises d'eau de plus grande taille, ainsi que pour l'anguille.



Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Test sur la centrale hydroélectrique d’Halsou .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.Méthodologie.....</b>	<b>10</b>
2.1.1. Sites d'étude .....	10
2.1.2. Equipement du site en antennes RFID et leurs efficacités de détection .....	11
2.1.3. Protocole de marquage et de lâcher des poissons.....	13
2.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests.....	14
<b>2.2.Résultats .....</b>	<b>16</b>
2.2.1. Efficacité de détection des antennes dans le dispositif de dévalaison .....	16
2.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison .....	16
2.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ? .....	17
2.2.4. Temps de passage .....	18
<b>2.3.Particularité du site d’Halsou .....</b>	<b>19</b>
<b>3. Test sur la centrale hydroélectrique de Trois-Villes .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1.Méthodologie.....</b>	<b>20</b>
3.1.1. Site d'étude .....	20
3.1.2. Equipement du site en antennes RFID et leurs efficacités de détection .....	21
3.1.3. Protocole de marquage et de lâcher des poissons.....	22
3.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests.....	23
<b>3.2.Résultats .....</b>	<b>24</b>
3.2.1. Efficacité de détection des antennes dans le dispositif de dévalaison .....	24
3.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison .....	24
3.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ? .....	25
3.2.4. Temps de passage .....	26
<b>3.3.Particularité du site de Trois-Villes .....</b>	<b>27</b>
<b>4. Test sur la centrale hydroélectrique de Gotein .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.Méthodologie.....</b>	<b>28</b>
4.1.1. Sites d'étude .....	28
4.1.2. Equipement du site en antennes RFID et efficacités de détection .....	29
4.1.3. Protocole de marquage et de lâcher des poissons.....	30
4.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests.....	31
<b>4.2.Résultats .....</b>	<b>31</b>
4.2.1. Efficacité de détection des antennes dans le dispositif de dévalaison .....	31
4.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison .....	31
4.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ? .....	32
4.2.4. Temps de passage .....	32

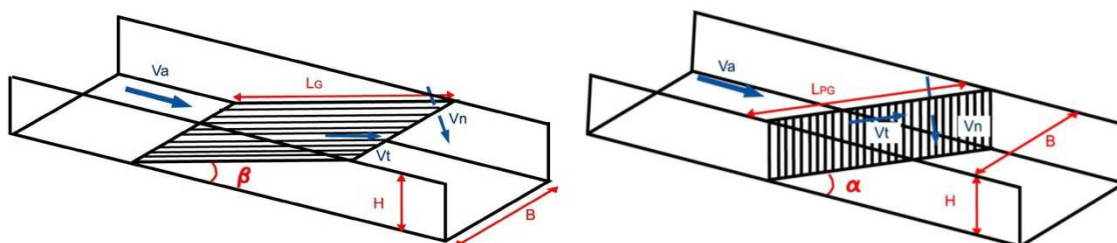
4.3.Particularité du site de Gotein .....	33
<b>5. Rappel du test sur la centrale hydroélectrique d’Auterrive (2015) .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.Méthodologie.....</b>	<b>34</b>
5.1.1. Site d'étude .....	34
5.1.2. Equipement du site en antennes RFID et efficacités de détection .....	35
5.1.3. Marquage et lâcher des poissons .....	36
<b>5.2.Résultats .....</b>	<b>36</b>
5.2.1. Efficacité de détection des antennes du canal de transfert .....	36
5.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison .....	36
5.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ? .....	37
5.2.4. Temps de passage .....	38
<b>5.3.Particularité du site d’Auterrive.....</b>	<b>38</b>
<b>6. Bilan des études et discussion .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1.Sites d’étude.....</b>	<b>39</b>
<b>6.2.Efficacité de passage par les dispositifs de dévalaison.....</b>	<b>39</b>
<b>6.3.L’efficacité du dispositif de dévalaison est-elle liée à la taille des poissons ?.....</b>	<b>41</b>
<b>6.4.Extrapolation des résultats aux populations sauvages .....</b>	<b>41</b>
<b>6.5.Temps de passage court par le dispositif de dévalaison .....</b>	<b>43</b>
<b>6.6.Comparaison avec les études existantes.....</b>	<b>43</b>
<b>6.7.Taux de survie à l’échelle des aménagements .....</b>	<b>44</b>
<b>6.8.Perspectives .....</b>	<b>46</b>
<b>7. Références.....</b>	<b>47</b>

## 1. Introduction

Depuis plusieurs dizaines d'années, des programmes de restauration et de protection des poissons migrateurs ont été mis en place en France. Une attention particulière a été portée sur le franchissement des poissons au niveau des ouvrages transversaux. Dans un premier temps, ces programmes ont eu pour objet de rendre les obstacles franchissables à la montaison afin que les poissons puissent atteindre les zones de reproduction. Plus récemment, l'attention s'est également portée sur la franchissabilité des aménagements pour les poissons en dévalaison (Larinier & Travade, 1999), notamment au niveau des ouvrages hydroélectriques du fait qu'ils peuvent causer des taux de mortalité des poissons importants (Gomes & Larinier, 2008). Cette problématique se pose avec acuité pour les smolts de saumon atlantique et de truite de mer du fait du nombre d'aménagements hydroélectriques pouvant être important sur leur parcours de migration, ainsi que pour les anguilles argentées du fait de leur taille importante engendrant des taux de mortalité élevés.

Une des solutions pour éviter ou du moins limiter l'entraînement des poissons dans les prises d'eau consiste en la mise en place de plan de grille à faible espacement libre entre barreaux associés à des exutoires de dévalaison. L'objectif de ces systèmes, dénommés "prises d'eau ichtyocompatibles", est d'atteindre de fortes efficacités de passage ( $> 90\%$ ) pour pouvoir limiter les impacts cumulés à l'échelle des axes de migration. Au regard des diagnostics menés sur les aménagements hydroélectriques de différents cours d'eau (voir par exemple Anonymous, 2002a b; Voegtli, 2010), de telles efficacités s'avèrent nécessaires pour réduire les taux de mortalité à l'échelle de chaque aménagement à moins de  $1\%$ , et leurs cumuls à moins de  $5-10\%$ . A partir des retours d'expérience acquis en France et à l'étranger sur l'efficacité de divers exutoires de dévalaison existants, les bases de conception et de dimensionnement de nouveaux systèmes ont été définies en 2008 (Courret & Larinier, 2008). Des études hydrauliques sur modèle réduit ont ensuite permis de confirmer ou préciser certains critères concernant l'implantation des plans de grille et la conception des exutoires et de produire des formules d'évaluation des pertes de charge adaptées à ces configurations (Raynal *et al.*, 2012, 2013). 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 dommages. Deux configurations de prises d'eau ichtyocompatibles ont été proposées (Figure 1) :

- un plan de grille très incliné par rapport à l'horizontale et disposé perpendiculairement à l'écoulement ; un ou plusieurs exutoires selon la largeur de la prise d'eau sont alors positionnés au sommet du plan de grille.
- un plan de grille quasi-vertical et orienté par rapport à la direction de l'écoulement ; l'exutoire est alors positionné à l'extrémité aval du plan de grille.



**Figure 1** : Plan de grille incliné par rapport à l'horizontale (à gauche) et orienté par rapport à la direction de l'écoulement (à droite) (source: Courret & Larinier, 2008).

Les principaux critères de dimensionnement des prises d'eau ichtyocompatibles selon Courret et Larinier (2008) portent sur :

- l'espacement libre maximal entre les barreaux pour arrêter les poissons, avec la préconisation d'adopter un espacement maximal de 25 mm pour les smolts (barrière comportementale), et un espacement de l'ordre de 15–20 mm pour les anguilles (nécessité d'installer une barrière physique) ;
- la vitesse normale maximale au plan de grille pour ne pas risquer le placage des poissons sur la grille ou leur passage prématuré au travers : de l'ordre de 50 cm/s pour les smolts et les anguilles ;
- l'inclinaison du plan de grille par rapport à l'horizontale avec un angle  $\beta \leq 26^\circ$  ou l'orientation par rapport à la direction de l'écoulement avec un angle  $\alpha \leq 45^\circ$ , pour assurer le guidage des poissons ;
- la conception des exutoires avec des critères sur le positionnement, le nombre, les dimensions et la vitesse d'écoulement en entrée, permettant de déterminer le débit à y allouer en fonction des caractéristiques de la prise d'eau (de 2-3 % à 5.5 % du débit maximal turbiné).

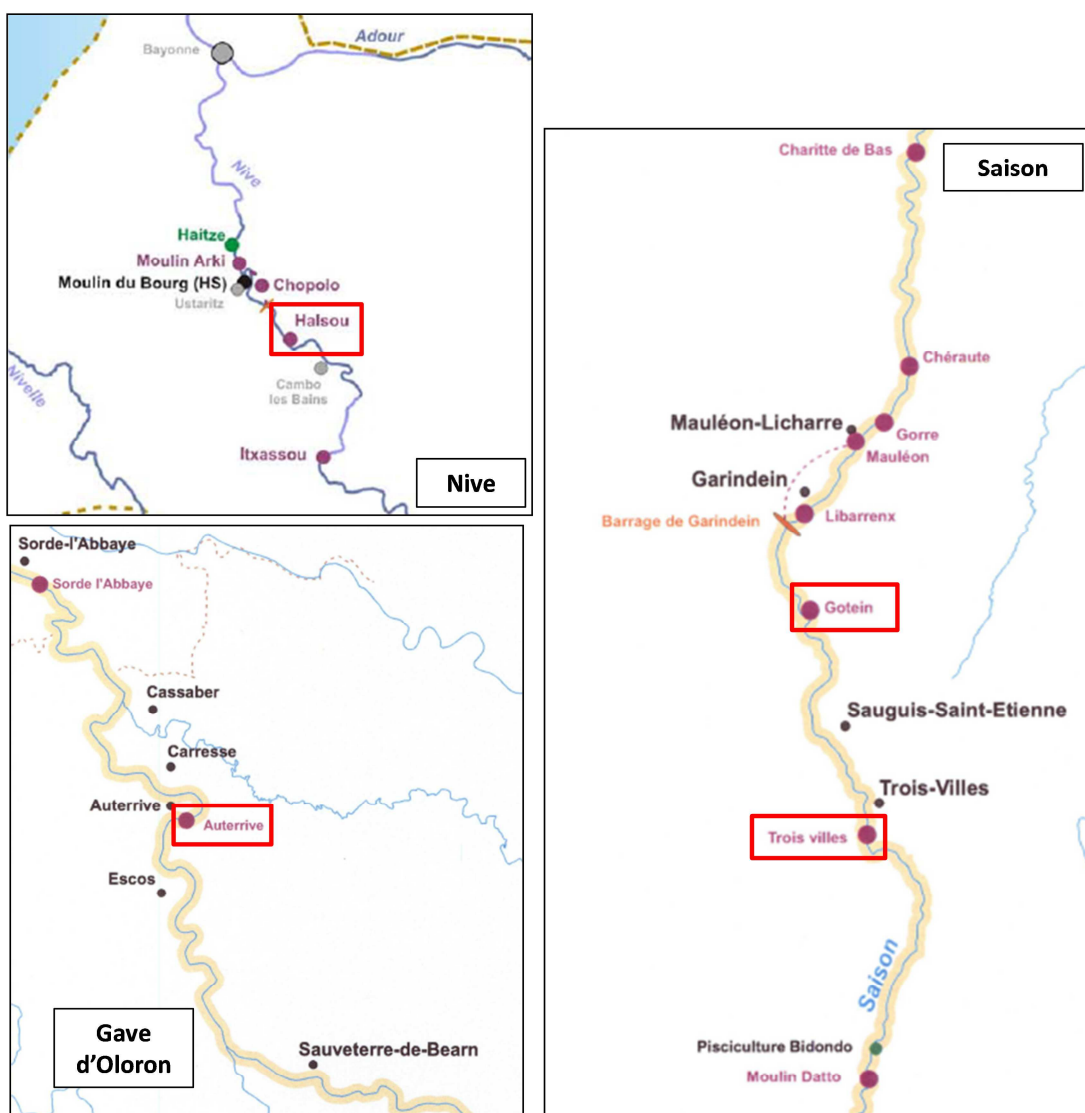
Le retour d'expérience sur l'efficacité d'exutoires associés à des plans de grilles pré-existants est déjà conséquent (Larinier & Travade, 1999 ; Travade et Larinier 2006). Cela a montré que, mis à part dans certaines configurations favorables, il a généralement été difficile d'atteindre des efficacités élevées pour les smolts, et encore plus difficile pour l'anguille. A ce jour, les prises d'eau ichtyocompatibles sont la solution la plus mise en œuvre en France pour rétablir une dévalaison sans dommage au niveau des centrales jusqu'à environ 100 m<sup>3</sup>/s. Il y a une préférence pour les plans de grille inclinés moins contraignants en termes de perte de charge et de dégrillage, hormis dans les cas propices à l'implantation d'un plan de grille orienté, dans le prolongement d'une berge notamment. Il demeure aujourd'hui nécessaire de tester *in situ* ces nouvelles configurations pour vérifier si les plus hautes efficacités sont bien atteintes.

Le pôle Ecohydraulique de l'Onema (actuellement Agence française pour la biodiversité) a réalisé au printemps 2015 le premier test de l'efficacité d'un tel dispositif de dévalaison pour les smolts de saumon atlantique sur la centrale hydroélectrique d'Auterrive sur le Gave d'Oloron (Tomanova, Alric & Courret, 2015). La répétition de cette expérience sur d'autres sites équipés d'un même dispositif de franchissement est toutefois apparue nécessaire pour valider les premiers résultats encourageants. En 2016, en collaboration avec le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF, ce retour d'expérience a été poursuivi sur trois autres sites : la centrale hydroélectrique d'Halsou sur la Nive et les centrales de Trois-Villes et de Gotein sur le Saison (Figure 2). Tous les tests ont été réalisés en avril 2016, durant la période de dévalaison naturelle des smolts de saumon atlantique. La méthode de marquage-détection, déjà utilisée en 2015 et dans d'autres études d'efficacité d'exutoires notamment en France (Croze, 2008 ; Bosc *et al.*, 2013) a été également retenue en 2016. Cette méthode consiste à marquer des poissons à l'aide de marques passives de type PIT-Tag, puis les lâcher en amont des sites et enfin détecter leur passage en installant des antennes RFID (Radio Frequency Identification) à des endroits stratégiques de passage (p.ex. canal de transfert du dispositif de dévalaison, passe à poissons). Cette technique de détection est appropriée uniquement pour des petits espaces (taille de l'antenne limitée), et ne permet donc pas de suivre le passage via la turbine, ni les éventuelles remontées des poissons dans le canal d'aménée. Mais compte-tenu du comportement attendu des smolts, on peut raisonnablement admettre l'hypothèse que la quasi-totalité des poissons relâchés dans le canal d'aménée dévaleront au niveau de la centrale. Aussi, pour limiter ces éventuelles remontées des poissons, seuls des sites avec un long canal d'aménée (550, 700 et 925 m) ont été choisis en 2016. En revanche, n'ayant pas la certitude sur le devenir des poissons non-détectés (supposés passés par la ou les turbines), les résultats présentés dans ce rapport correspondent à l'efficacité minimale du dispositif de dévalaison, bien que vraisemblablement proche de l'efficacité réelle étant données les raisons évoquées ci-dessus.

Au cours de cette étude, trois principales questions ont été examinées en détails :

- Quelle est l'efficacité de passage par le dispositif de dévalaison (grille associée à l'exutoire/canal de transfert) et quelle est l'efficacité de passage global sur chaque site étudié ?
- Compte tenu du fait que les individus de taille inférieure à 20 cm peuvent physiquement passer au travers d'une grille avec un espacement entre les barreaux de 20 mm, est-ce que l'effet répulsif comportemental d'une telle grille a tendance ou non à diminuer pour les poissons de petites tailles ?
- Quel est le temps de passage par le dispositif de dévalaison et donc l'éventuel retard à la migration ?

Les résultats sont présentés pour chacun des 4 sites (partie 2 à 5), puis un bilan des résultats est présenté et discuté (partie 6).



**Figure 2 :** Localisation des aménagements hydroélectriques étudiés sur la Nive, le Gave d'Oloron et le Saison (source : Anonymous, 2002a b; Voegtli, 2010).

## 2. Test sur la centrale hydroélectrique d’Halsou

### 2.1. Méthodologie

#### 2.1.1. Sites d’étude

La centrale hydroélectrique d’Halsou se situe sur la partie aval de la Nive (Pyrénées-Atlantiques) à environ 23 km de la mer (Figure 4a). La Nive est un affluent rive gauche de l’Adour et son module à Cambo-les-Bains (Halsou) est de  $30.2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (période 1967-2016, source Banque Hydro).

La centrale d’Halsou dérive les eaux de la Nive dans un canal d’aménée de 925 m de long et de 11 m de large (Figure 4b et c). La centrale est équipée de 3 turbines Francis horizontales : deux turbines turbinant jusqu’à  $8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et une turbine (la plus en rive droite) turbinant jusqu’à  $14 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Le débit maximum turbiné par la centrale est donc de  $30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  sous une chute de 4.25 m. Le mur rive droite du canal d’aménée est un déversoir sur sa partie terminale au niveau de l’usine, permettant de déverser dans un canal de décharge en cas de déclenchement de groupe (Figure 4c et e). La grille de prise d’eau (largeur 20.9 m ; hauteur 4.7 m) est une grille fine (20 mm d’espacement inter-barreaux), orientée à  $25^\circ$  par rapport à l’axe de l’écoulement, et inclinée à  $64^\circ$  par rapport à l’horizontal (Figure 3). La vitesse maximale dans le canal d’aménée est de  $1.6 \text{ m}.\text{s}^{-1}$  (Gosset et al. 2005) et la vitesse d’approche de  $0.44 \text{ m}.\text{s}^{-1}$ . Un dégrilleur permet l’évacuation des débris dans une goulotte débouchant dans le canal de décharge.

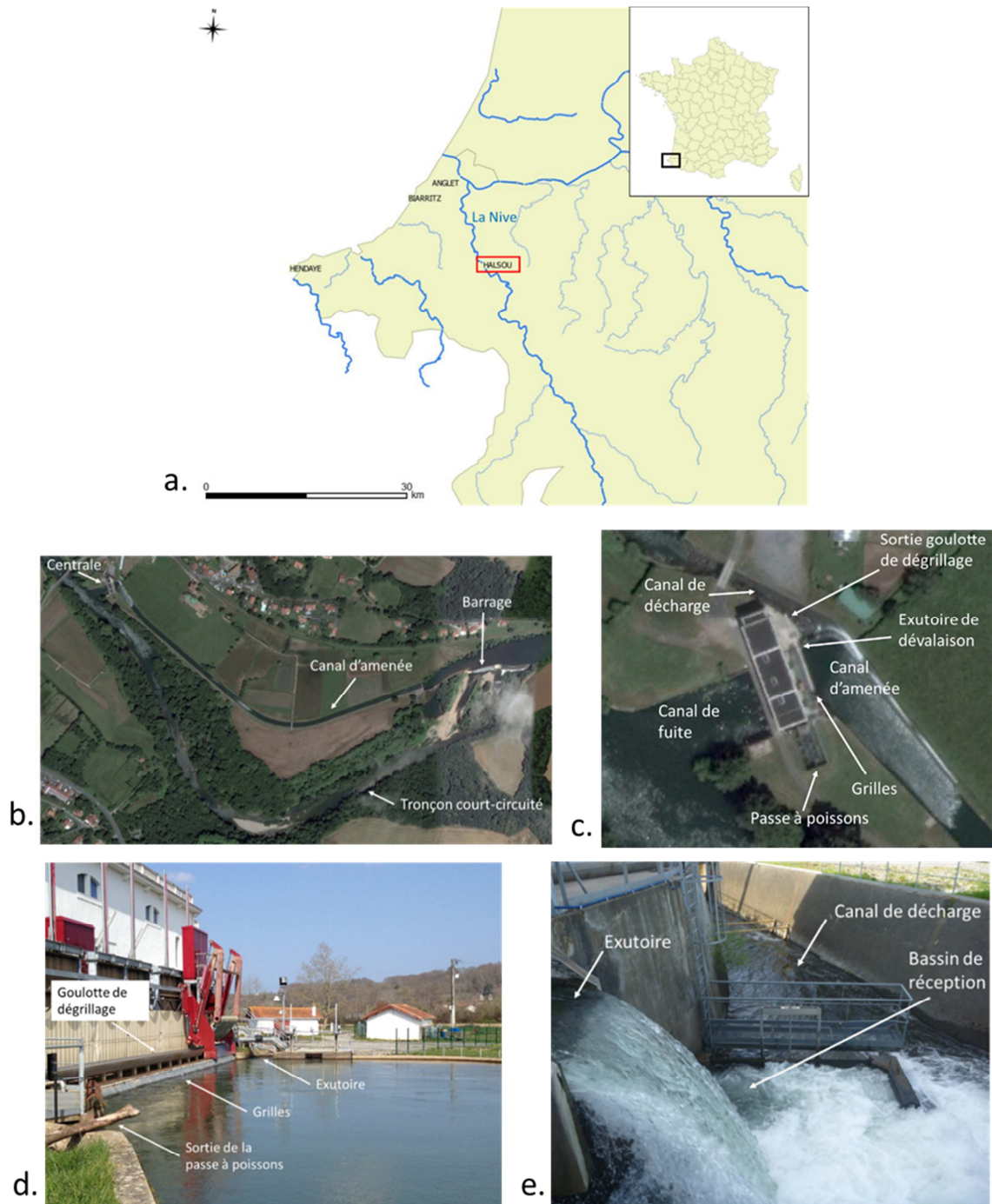
Cours d'eau		Nive
Nom Ouvrage		Halsou
Débit équipement	$\text{m}^3/\text{s}$	30
Largeur de la prise d'eau	$\text{m}$	20,9
Hauteur d'eau	$\text{m}$	3,6
Longueur du canal d'aménée	$\text{m}$	925
Vitesse d'approche	$\text{m/s}$	0,44
Espacement libre entre barreaux	$\text{mm}$	20
Inclinaison (angle $\beta$ )	$^\circ$	64
Orientation (angle $\alpha$ )	$^\circ$	25
Débit alloué à la dévalaison	$\text{m}^3/\text{s}$	1-1,5
Nb d'exutoires	$\text{nb}$	1
Largeur Exutoire 1	$\text{m}$	1,38
Type de Goulotte		séparée



**Figure 3** : Principales caractéristiques de la prise d'eau de la centrale hydroélectrique d’Halsou.

Un exutoire de dévalaison de surface est situé en rive droite à l’extrémité aval du plan de grille (Figure 3 et Figure 4). Il est constitué d’un court radier en béton d’une largeur de 1.38 m prolongé par un clapet d’une largeur de tablier de 1.37 m et d’une hauteur de 1.16 m. Ce clapet a été modifié pour satisfaire à de nouvelles exigences en termes de débit et de lame d’eau déversante minimaux : 5 % du débit turbiné instantané et 50 cm minimum de lame d’eau. Le débit qui transite par l’exutoire est donc compris entre 1 et  $1.5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Les vitesses qui en résultent dans l’exutoire au niveau du radier béton sont comprises entre  $0.7 \text{ m}.\text{s}^{-1}$  à niveau bas et  $1.4 \text{ m}.\text{s}^{-1}$  à niveau haut. Le clapet déverse dans un bassin de réception de 1.2 m de profondeur lui-même déversant dans le canal de décharge. Ce canal de décharge rejoint la Nive environ 400 m en l’aval. L’exutoire est éclairé de mars à juin par une lampe à vapeur de mercure située 1.5 m au-dessus de l’exutoire pour en augmenter son attractivité. Le site est équipé d’une passe à bassins avec la sortie de la passe située à gauche de la grille (Figure 3).





**Figure 4** : Vues d'ensembles et photos de l'aménagement d'Halsou : a. Localisation de la Nive en France, b. Vue aérienne de l'aménagement, c. vue aérienne de la centrale, d. photo de la centrale vue de l'amont et e. photo de l'aval de l'exutoire.

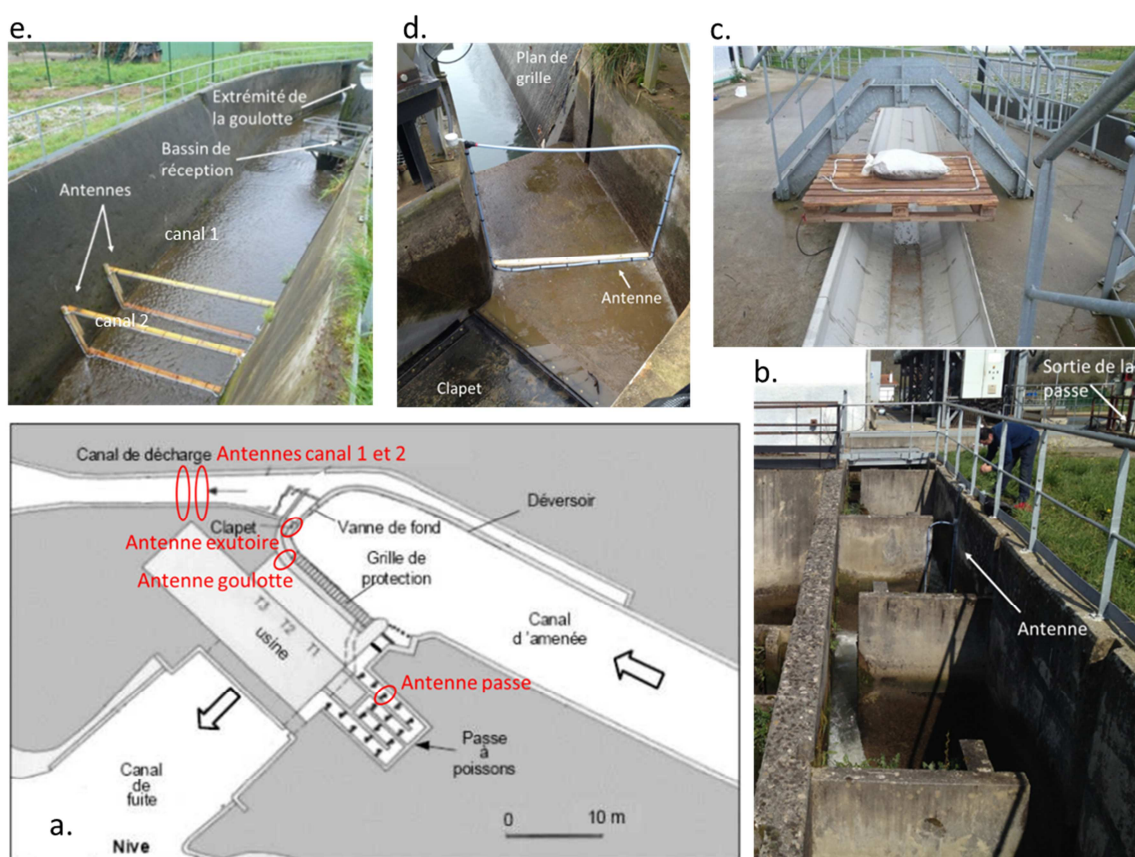
### 2.1.2. Equipement du site en antennes RFID et leurs efficacités de détection

Sur le site d'Halsou, 5 antennes ont été installées (Figure 5) :

- Une antenne dans la passe à poissons au niveau de la 3<sup>ème</sup> échancrure en partant de l'amont de la passe. Bien que n'étant pas une voie de dévalaison a priori prépondérante, cette antenne permet de contrôler le passage éventuel de certains smolts ;
- Une antenne dans la goulotte d'évacuation des dégrillats. Cette antenne permet de vérifier l'éventuel passage de smolts qui auraient été entraînés par le dégrilleur ;



- Une antenne dans l'exutoire de dévalaison. Celle-ci est située sur le coursier en béton à environ 0.8 - 1 m en aval de l'entrée de l'exutoire, en amont du clapet. Cette antenne peut aussi détecter des smolts qui trouvent l'exutoire mais ne le franchissent pas et reviennent en amont. Toutefois, sa position aval dans la zone d'accélération à proximité du clapet doit limiter ce phénomène ;
- Deux antennes dans le canal de décharge une vingtaine de mètres en aval du bassin de réception situé sous le clapet de dévalaison. Ces antennes permettent de valider le franchissement des smolts. Dans cette zone, la vitesse du courant est relativement importante même lorsque le canal est alimenté par le débit de l'exutoire seul. En cas de déclenchement de groupe et donc de déversement par-dessus le canal d'amenée, les débits, vitesses et turbulences dans le canal de décharge peuvent devenir très importants. Pour sécuriser la détection, il a donc été décidé d'installer deux antennes protégées par des bastaings en bois séparées d'environ 1.5 m.



**Figure 5:** Système de détection RFID installé à Halsou : a. vue d'ensemble, b. antenne passe, c. antenne goulotte, d. antenne exutoire, e. antennes canal de décharge.

Les distances de détection des antennes « hors d'eau », mesurées au cours de l'installation (avec une marque de 23 mm), sont de 50 à 80 cm de part et d'autre de chaque antenne (Tableau 1) et aucune antenne ne présente de zone d'absence de détection dans son champ. Il est à noter que, dans le canal de décharge, la proximité des deux antennes crée une zone de détection continue d'environ 2.5 m répartie sur les deux antennes.

**Tableau 1:** Distances de détection des antennes mesurées lors de l'installation.

Antenne	Distance de détection de part et d'autre
Passe à poisson	80 cm
Goulotte du dégrilleur	80 cm
Exutoire de dévalaison	50 cm
Canal 1	50 cm
Canal 2	60 cm

Deux types de tests ont été effectués pour évaluer l'efficacité de détection des antennes dans le canal de décharge : i) un lâcher de 10 poissons un par un en amont des antennes (test ind10) et ii) un lâcher de 10 poissons en même temps (test gr10, Tableau 2). Il a pu être observé une moins bonne détection de l'antenne amont (canal 1) par rapport à l'antenne aval (canal 2), mais dans l'ensemble, l'efficacité de ce dispositif est de 100 % pour les passages un par un. Lorsque les individus passent en groupe de 10 et très rapprochés, l'efficacité diminue à 50 %. Cela n'est toutefois pas inquiétant dans la mesure où les retours d'expérience sur d'autres sites et nos observations *in situ* montrent que les passages de smolts dans les goulottes de dévalaison sont généralement plus espacés dans le temps que les passages en groupe simulés. Par conséquent, nous supposons que tous les individus passant par le canal de transfert ont été détectés par nos antennes.

**Tableau 2 :** Efficacité de détection des antennes (en %) dans le canal de décharge sur le site d'Halsou (test ind10 : 10 individus lâchés un par un, test gr10 : 10 individus lâchés d'un coup).

	test ind10	test gr10
canal 1	70	30
canal 2	100	50
canal 1+2	100	50

### 2.1.3. Protocole de marquage et de lâcher des poissons

Le marquage de tous les poissons utilisés pour les tests sur les trois sites de 2016 s'est déroulé le 29 et 30 mars 2016 à la pisciculture de Castels appartenant à l'association MIGADO. Au total, 1051 poissons ont été marqués avec les marques PIT-tag de 23 mm sous anesthésie à l'eugénol. Uniquement deux poissons morts ont été observés après le marquage (aucune mortalité différée).

Les poissons ont été transportés sur le site d'Halsou le 11/04/16 et ont été mis en stabulation 1 à 2 jours suivant les lots dans un bassin circulaire ( $\varnothing = 3 \text{ m}$ ,  $H = 0.85 \text{ m}$ ,  $V \sim 5 \text{ m}^3$ ) alimenté en eau du canal par une pompe débitant environ 200 l/min (Figure 6).



**Figure 6:** Bassin de stabulation utilisé pour les smolts avant leur lâché.

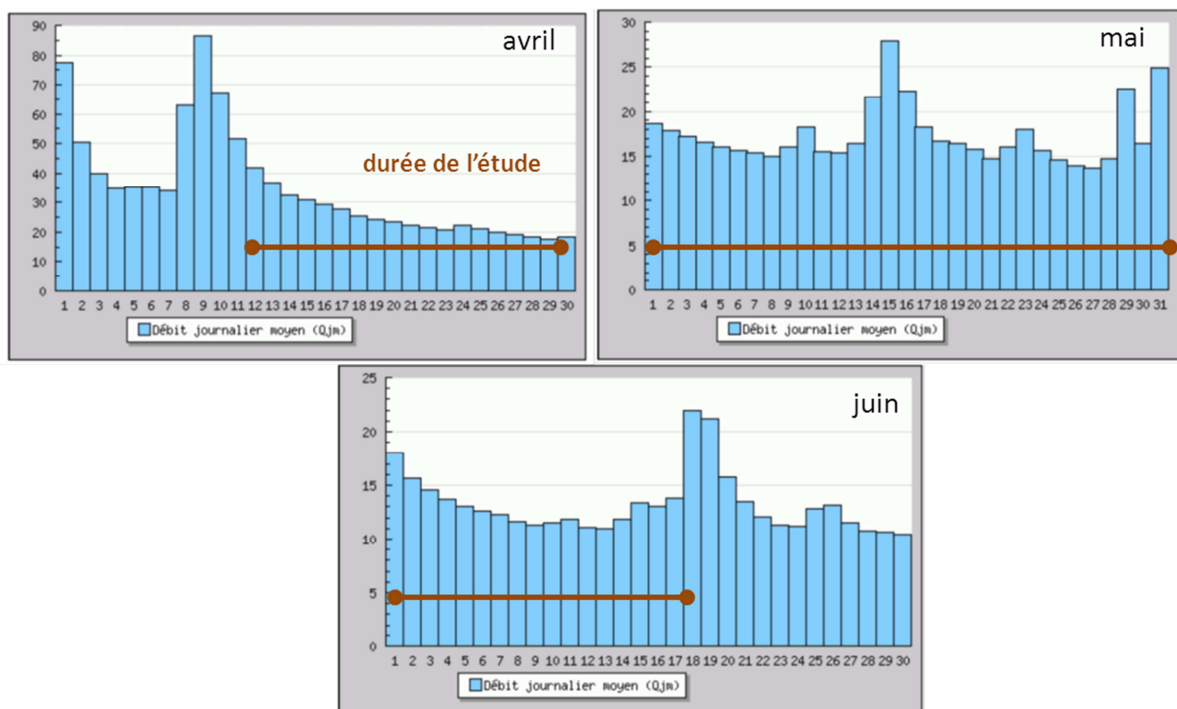
Au total, 338 poissons ont été relâchés à Halsou en 6 lots entre le 12 et le 13 avril 2016 entre 18h et 23h (Tableau 3) à 92 m de l'usine. La taille moyenne des individus lâchés est de 185.4 mm (min - max : 137 - 213 mm) et varie peu entre les lots (ANOVA,  $p < 0.05$ ) bien que le lot 1 ait des tailles légèrement inférieures. Le suivi a été poursuivi jusqu'au 7 juillet 2016.

**Tableau 3 :** Nombre de poissons et leurs tailles pour chaque lot, dates et heures des lâchers sur le site d'Halsou (HAL).

Lots	Nombre d'ind.	Date de lâcher	Heure de lâcher	Taille (mm)		
				Moyenne $\pm$ Écart-type	Min	Max
HAL_L1	50	12/04/2016	17:49 soir	184,4 $\pm$ 11,1	155	210
HAL_L2	50	12/04/2016	21:13 nuit	185,8 $\pm$ 12,7	137	210
HAL_L3	50	12/04/2016	22:47 nuit	185,5 $\pm$ 9,6	167	205
HAL_L4	50	13/04/2016	18:15 soir	185,2 $\pm$ 14,2	144	213
HAL_L5	66	13/04/2016	21:42 nuit	184,8 $\pm$ 11,7	157	212
HAL_L6	72	13/04/2016	23:05 nuit	186,4 $\pm$ 10,0	166	210

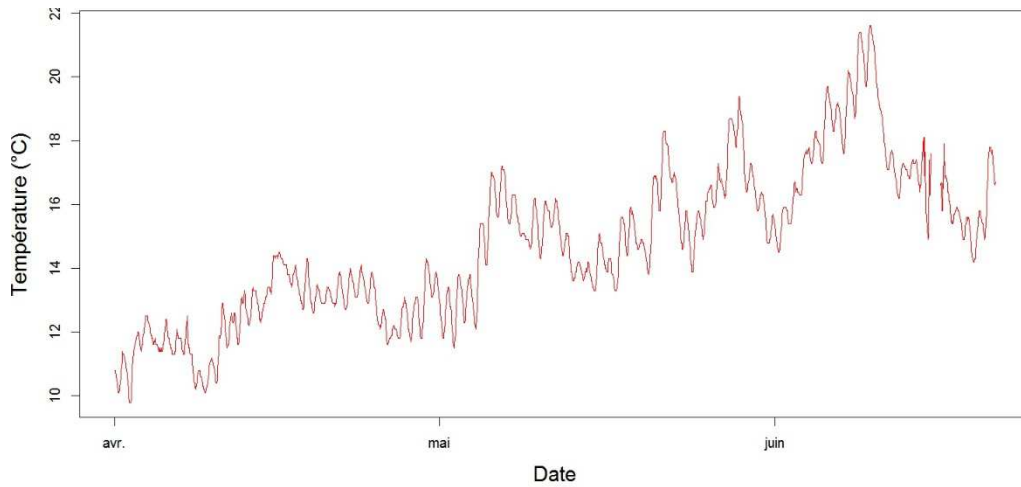
#### 2.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests

Pendant la période d'étude (mi-avril à fin juin), le débit de la Nive (Figure 7) a décliné progressivement durant le mois d'avril (de  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à environ  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) jusqu'à la fin de la première semaine de mai (environ  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Il s'est ensuite stabilisé durant le mois de mai avec trois hausses modérées du débit ( $28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  le 15 mai,  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  le 29 mai et  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  le 31 mai). Une nouvelle hausse modérée du débit est intervenue le 18 juin ( $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



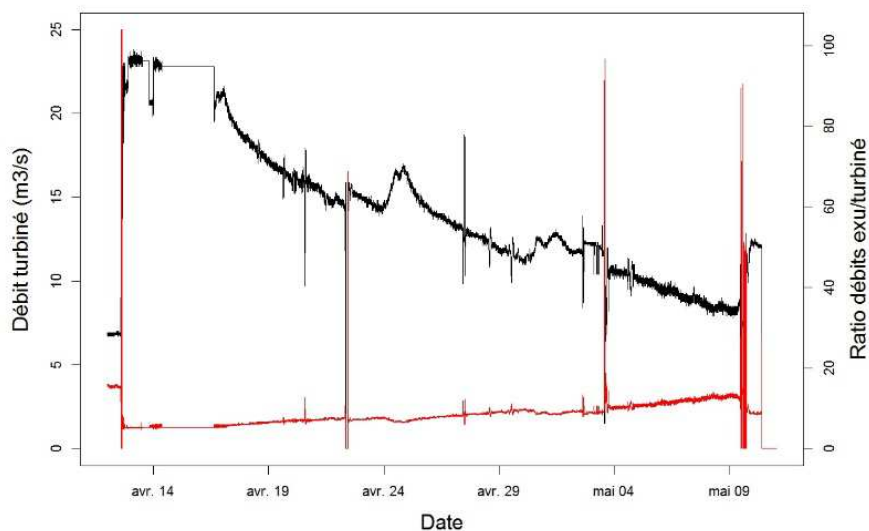
**Figure 7:** Débits moyens journaliers ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) de la Nive à Cambo-les-Bains en avril, mai et juin 2016 (source Banque Hydro).

La température de la Nive (Figure 8) a progressivement augmenté durant les mois de mai et juin : d'environ 10 à 12-13°C au mois d'avril et de 12-13 à 15-16°C au mois de mai. Au mois de juin, celle-ci a fortement augmenté durant la première quinzaine jusqu'à environ 20°C, puis a fortement diminué ensuite pour revenir à environ 16°C.



**Figure 8:** Température horaire des eaux de la Nive d'avril à juin (source EDF)

Le débit turbiné et le débit transitant par l'exutoire de dévalaison sont représentés sur la Figure 9 (données disponibles uniquement jusqu'au 11 mai 2016). Jusqu'au 11 mai, on observe globalement une décroissance des débits turbinés. Le débit turbiné moyen entre le 12 avril et le 11 mai a été de  $13.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et a varié de 0 (ponctuellement) à  $23.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Inversement, le ratio de débit entre l'exutoire et l'usine a globalement augmenté. Il a été en moyenne de 8.2 % et a varié entre 5 et 15 %, avec quelques valeurs élevées lors de déclenchement ponctuels de l'usine. L'essentiel des smolts ayant dévalé durant les premiers jours de l'expérimentation, on peut considérer que l'efficacité de l'exutoire a été testée pour un débit turbiné de 20-23  $\text{m}^3/\text{s}$  et un débit d'exutoire de l'ordre de 5 %.



**Figure 9:** Fonctionnement de l'usine d'Halsou pendant la période d'étude (en noir - débit turbiné ; en rouge - ratio entre débit de l'exutoire et débit turbiné, en %).

## 2.2. Résultats

### 2.2.1. Efficacité de détection des antennes dans le dispositif de dévalaison

En faisant l'hypothèse que tous les individus transitant par le canal de décharge ont été détectés par au moins une antenne, l'efficacité de détection de chacune des antennes peut être calculée comme suit :

$$Eff_{ant\ X} = \frac{N_{ant\ X}}{N_{tot}}$$

avec  $N_{ant\ X}$  le nombre total d'individus détectés par l'antenne X (canal 1 ou canal 2) et  $N_{tot}$  le nombre total d'individus détectés par les 2 antennes.

#### *Canal de décharge*

L'efficacité de l'antenne canal 1 est donc de 75 % (218/292) et l'efficacité de l'antenne canal 2 est de 97 % (282/292). Cette différence, qui confirme les tests préliminaires (Tableau 2), peut paraître surprenante étant donné la conception identique et le positionnement rapproché des deux antennes. Un environnement particulier (ferrailage dans le mur bajoyer par exemple) de la première antenne pourrait expliquer ce phénomène. En effet, la RFID est une technologie très sensible à toute perturbation des champs électromagnétiques.

#### *Exutoire*

Sur les 287 smolts ayant franchi l'ouvrage par l'exutoire, 212 ont été détectés à l'antenne de l'exutoire soit une efficacité de détection de 74 % (en considérant une efficacité de détection dans la goulotte du dégrilleur de 100 %).

### 2.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison

A la date du dernier téléchargement des données (7/7/2016), 304 poissons ont été détectés sur au moins une des antennes installées. 225 smolts ont été détectés à l'antenne de l'exutoire, 292 dans le canal de décharge. Sur ces 292 smolts détectés dans le canal de décharge, 212 ont été détectés à l'exutoire et 5 poissons dans la goulotte du dégrilleur. Un seul poisson a été détecté dans la passe à poissons et l'a empruntée de l'aval vers l'amont après être passé par l'exutoire et le canal de décharge.

Concernant les 5 poissons détectés dans la goulotte d'évacuation des dégrillats, l'étude des horaires de passage montre que ces poissons sont tous passés simultanément le 13 avril à 21h57. Il s'agissait donc d'un groupe de poissons ayant été « happé » par le dégrilleur en fonctionnement. Ce phénomène semble donc être anecdotique avec finalement un seul évènement répertorié comprenant un groupe de poissons durant toute l'étude. De plus, le passage de ces poissons ayant pu être observé visuellement, ceux-ci semblent avoir rejoint le canal de décharge en bon état. Toutefois, ils n'ont pas été pris en compte dans le calcul de l'efficacité du dispositif de dévalaison.

L'efficacité moyenne de passage par l'exutoire est de 84.5 % et varie entre 72 % (lot 1) et 94.4 % (lot 6, Tableau 4). Toutefois, les smolts du lot 1 sont restés plus de temps en stabulation dans une bassin avant d'être relâchés et 4 à 5 individus semblaient « faibles » au moment du lâcher. 2 individus de ce groupe ont été ensuite observés plaqués sur la grille de la prise d'eau avant de franchir par l'exutoire. Ce phénomène n'a pas été observé sur les 5 autres lots relâchés avec davantage de précaution. Si l'on retire les résultats du lot 1 biaisé par de mauvaises conditions de stabulation, l'efficacité moyenne de passage par l'exutoire est de 87 % (min – max : 86 – 94.4 %, Tableau 4).

**Tableau 4 :** Nombre et proportion des poissons (%) détectés dans les différentes voies de passage sur le site d'Halsou (en gris : les lots lâchés le soir).

LOT	Total d'ind. deversés	Nombre d'individus non détectés	Nombre d'individus détectés dans				% d'individus détectés dans			
			exutoire	canal de décharge	goulotte de dégrillats	passe à poissons	exutoire	canal de décharge	goulotte de dégrillats	passe à poissons
HAL_L1	50	14	32	36	0	0	64	<b>72</b>	0	0
HAL_L2	50	3	35	43	0	0	70	<b>86</b>	0	0
HAL_L3	50	6	36	43	0	0	72	<b>86</b>	0	0
HAL_L4	50	1	45	45	0	0	90	<b>90</b>	0	0
HAL_L5	66	6	36	52	5	0	54,5	<b>78,8</b>	7,6	0
HAL_L6	72	4	41	68	0	0	56,9	<b>94,4</b>	0	0

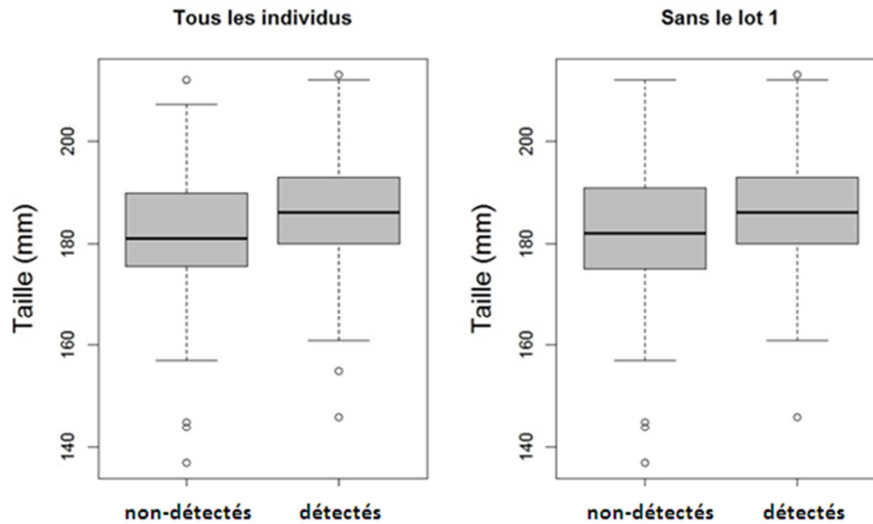
<b>Efficacité moyenne L1-L6</b>	67,9	<b>84,5</b>	1,3
<b>± Ecart-type</b>	12,8	<b>8,0</b>	3,1
<b>Efficacité moyenne L2-L6</b>	68,7	<b>87,0</b>	1,5
<b>± Ecart-type</b>	14,2	<b>5,8</b>	3,4

### 2.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ?

L'objectif de cette partie est de tester si la taille des individus a un effet sur leur passage au travers de la grille. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que les individus non-détectés sont passés à travers la grille et la turbine. La différence de taille entre les individus qui ont emprunté l'exutoire et ceux qui ne l'ont pas emprunté (détectés ou non) a été testée avec un t-test (les 5 poissons détectés dans la goulotte d'évacuation des dégrillats ont été écartés de cette analyse).

La Figure 10 présente la distribution des tailles pour les poissons ayant franchi la centrale par l'exutoire (individus détectés dans le canal de décharge) et pour ceux n'ayant pas franchi. On constate que la taille des poissons ayant franchi par l'exutoire est significativement supérieure à celle des poissons n'ayant pas franchi (taille moyenne de 186.2 mm contre 180.8 mm ; t-test,  $p = 0.003$ ). Si on écarte de cette analyse le lot 1, pour lequel un problème de stabulation avant lâché est soupçonné et dont les individus sont de tailles légèrement inférieures par rapport aux autres lots (Tableau 3), on observe toujours une différence significative en taille (t-test,  $p = 0.01$ ) ; les individus n'ayant pas été détectés au franchissement étant toujours plus petits (taille moyenne 180.8 mm contre 186.2 mm). Pour conclure, il apparaît bien un effet de la taille sur la probabilité de franchir l'aménagement par l'exutoire, indiquant possiblement un effet répulsif moindre de la grille pour les plus petits poissons.

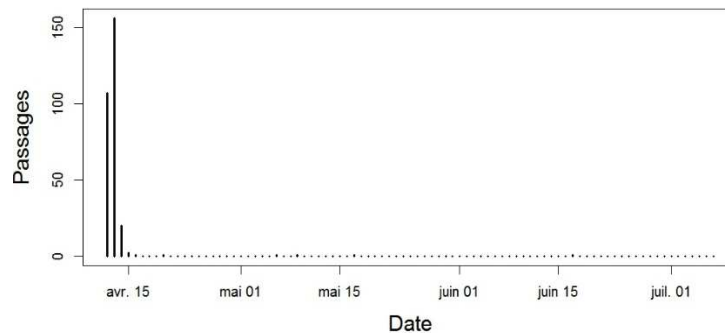




**Figure 10 :** Tailles des poissons détectés versus non-détectés dans le canal de décharge, avec et sans le LOT1. (les individus passés par la goulotte d'évacuation des dégrillats ont été exclus de cette analyse).

#### 2.2.4. Temps de passage

La quasi-totalité des smolts a franchi l'aménagement d'Halsou dans les premiers jours après leur lâcher (Figure 11). En effet, 98 % des smolts ont franchi l'aménagement dans les 5 premiers jours (286/292) et 90 % dans les 2 premiers jours (263/292). Ensuite, 1 autre passage est intervenu le 20 avril, puis 3 passages au mois de mai (le 6, le 9 et le 17 mai) et enfin un passage est intervenu le 17 juin. Il est à noter que ce dernier poisson a eu un comportement atypique : il a été détecté une première fois le 29 avril avant de franchir l'exutoire le 17 juin. Puis, il a stationné dans le canal de décharge jusqu'au 4 juillet avant de franchir les antennes du canal de décharge.



**Figure 11:** Cinétique des passages de poissons déversés sur le site d'Halsou.

Le temps d'approche a été calculé pour chaque individu détecté à l'antenne de l'exutoire. Ce temps correspond au temps entre le lâcher dans le canal d'amenée et la première détection au niveau de l'entrée de l'exutoire (Tableau 5). Les premières approches vers l'exutoire sont enregistrées peu de temps (souvent moins d'une minute) après le déversement des poissons dans le canal d'amenée. Seul l'ordre de grandeur de ces temps d'approche est à considérer car en valeur absolue, le calcul de ces temps inclue une faible précision sur l'horaire de relâche (renseigné uniquement à la minute près) et potentiellement une dérive de quelques secondes imputables aux coffrets de détections. Dans l'ensemble, 50% des individus mettent moins de 15 minutes pour trouver et s'approcher de l'exutoire et 75% des individus le font en moins de 1h36min. Cependant, ce temps est assez variable entre les lots. Les temps d'approche sont plus longs pour les lots déversés le soir (médiane de



1h09min pour le lot 1 et de 1h54min pour le lot 4) et beaucoup plus courts quand les poissons ont été lâchés la nuit (médiane entre 6 et 12min, Tableau 5).

**Tableau 5:** Temps d’approche (entre le lâcher des poissons dans le canal d’aménée et la première détection à l’exutoire) sur le site d’Halsou (en gris : les lots lâchés le soir).

	Nb d'ind.	min	Q25	mediane	Q75	max
LOT1	32	0:01:14	0:06:42	1:09:00	2:07:06	4:36:00
LOT2	35	< 1 min	0:02:15	0:08:54	0:14:30	73,4 j
LOT3	36	< 1 min	0:01:24	0:06:30	1:10:36	8:36:00
LOT4	45	0:11:36	0:50:00	1:54:00	2:48:00	75,2 j
LOT5	36	< 1 min	0:01:43	0:08:12	0:10:48	25,8 j
LOT6	41	< 1 min	0:05:54	0:11:54	0:29:48	1 j
Total		< 1 min	0:05:20	<b>0:14:30</b>	<b>1:36:00</b>	75,2 j

Le Tableau 6 présente les temps de passage, *i.e.* les temps entre le lâcher et la dernière détection dans le canal de décharge (les individus passés par la goulotte d’évacuation des dégrillats ne sont pas pris en compte). Les premiers passages par le canal de décharge sont enregistrés quelques secondes après le déversement des poissons dans le canal d’aménée, et en moins de 2min pour la plupart des lots. Dans l’ensemble, 50% des individus mettent moins de 21min pour contourner l’usine en empruntant l’exutoire et le canal de décharge et 75% des individus le font en moins de 2h30min. De façon attendue, les temps de passage sont plus longs pour les lots déversés le soir (médiane de 1h44min pour le lot 1 et de 2h57min pour le lot 4) et plus courts pour les poissons relâchés la nuit (médiane entre 11 et 21min, Tableau 6).

**Tableau 6:** Temps de passage (entre le lâcher et la dernière détection dans le canal de décharge ; les individus passés par la goulotte d’évacuation des dégrillats ne sont pas pris en compte) sur le site d’Halsou (en gris : les lots lâchés le soir).

	Nb d'ind.	min	Q25	mediane	Q75	max
LOT1	36	0:01:46	0:10:15	1:43:36	3:12:54	6:00:00
LOT2	43	< 1 min	0:04:09	0:11:15	0:25:45	4:54:00
LOT3	43	0:01:06	0:02:30	0:21:12	1:41:06	22:30:00
LOT4	45	0:50:12	2:18:12	2:57:06	3:14:00	82,5 j
LOT5	52	0:01:06	0:02:54	0:10:30	0:23:20	34 j
LOT6	68	< 1 min	0:05:06	0:14:06	0:46:20	7 j
Total		< 1 min	0:04:54	<b>0:21:30</b>	<b>2:30:00</b>	82,5 j

### 2.3. Particularité du site d’Halsou

Compte tenu des doutes qu’on a sur le LOT 1 et son possible biais sur les résultats, l’efficacité du dispositif de dévalaison installé sur le site d’Halsou sera présentée comme une fourchette de valeur : avec et sans le LOT1. Cette efficacité est satisfaisante avec en moyenne une efficacité de passage minimale entre 84 et 87 %.

Des études d’efficacité du dispositif préexistant sur Halsou, dispositif proche de l’actuel mais avec une grille aux espacements interbarreaux plus larges (30 mm contre 20 mm actuellement) et un débit d’alimentation de l’exutoire moindre, ont été mené par Larinier et Boyer-Bernard (1991) et Gosset et al. (1998). Hors période de déversement au barrage et déclenchement de l’usine, Larinier

et Boyer-Bernard (1991) ont mesuré entre 87.5 à 100 % de l'efficacité de passage (testée avec 4 lots de seulement 7 à 23 poissons). Ces très bonnes efficacités n'ont cependant pas été confirmées plus tard par Gosset et al (1998) qui rapportent entre 32 et 78 % d'efficacité de passage, avec une moyenne de 56 % (testé avec 9 lots de 60 à 100 poissons). Avec une grille plus fine, notre étude montrent une nette amélioration de l'efficacité du dispositif de dévalaison, avec un gain d'environ 30 % (en comparant la valeur moyenne rapportée ici avec celle de Gosset et al., 1998).

### 3. Test sur la centrale hydroélectrique de Trois-Villes

#### 3.1. Méthodologie

##### 3.1.1. Site d'étude

La centrale hydroélectrique de Trois-Villes (Figure 12), sur la commune de même nom (département 64), se situe en dérivation sur le cours d'eau Saison, principal affluent du gave d'Oloron (débit moyen  $22.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  au niveau du site). Son débit maximal turbiné est de  $4.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ce site présente un long canal d'aménée (550 m). Le plan de grille est incliné à  $26^\circ$  et l'espacement entre les barreaux est de 20 mm. La vitesse d'approche moyenne est de  $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Un exutoire d'un mètre de largeur et 0.5 m de profondeur est situé en rive gauche, à l'extrémité du plan de grille. Le débit alloué à la dévalaison transitant par le canal de transfert (qui contourne l'usine par la droite, Figure 13) est de  $0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , correspondant à 4.9 % du débit maximal turbiné. La vitesse en entrée de l'exutoire est de  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le site est équipé d'une passe à ralentisseurs, d'une rampe à anguilles et d'un canal de décharge (la vanne de décharge s'ouvre automatiquement si le débit du canal d'aménée dépasse le débit maximal turbiné).

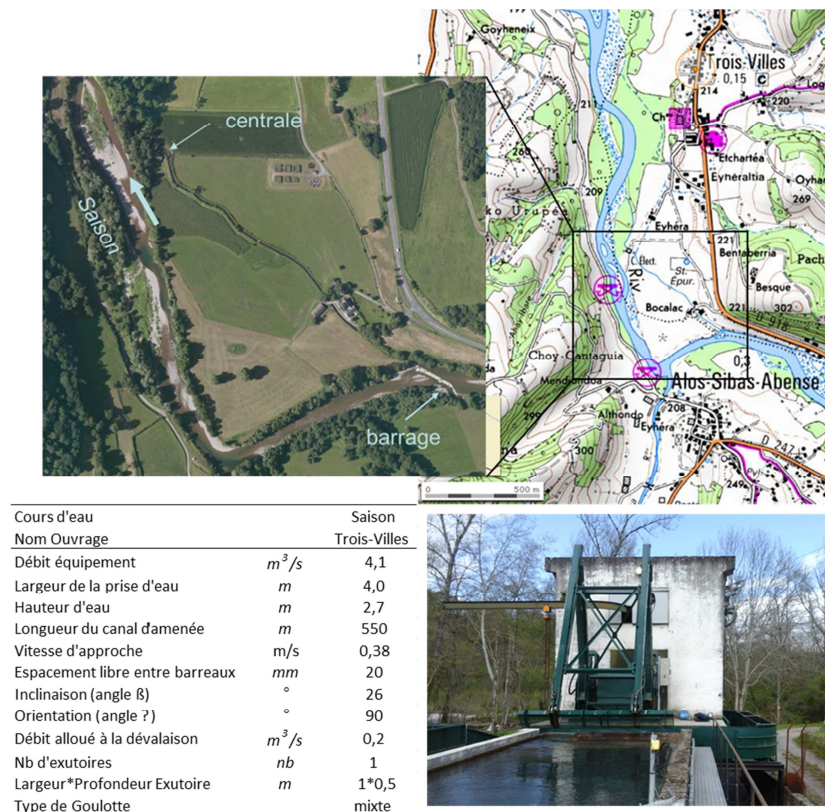
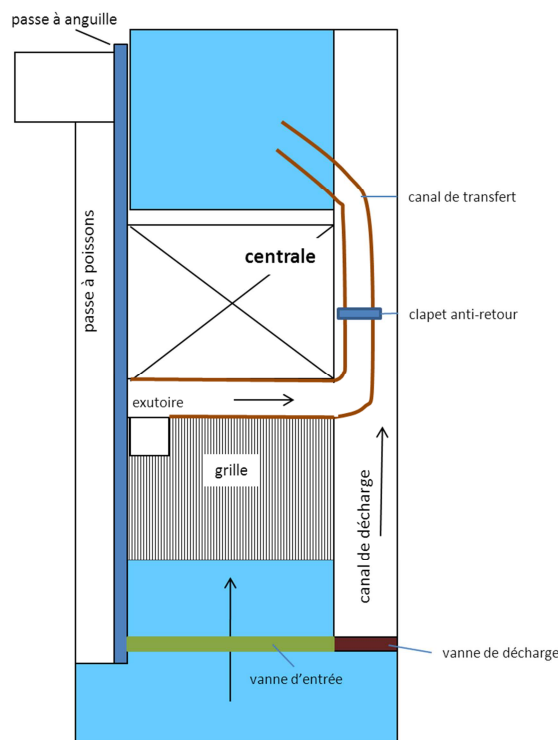


Figure 12 : Localisation et principales caractéristiques de la prise d'eau de Trois-Villes sur le Saison.



**Figure 13** : Schéma de la centrale hydroélectrique de Trois-Villes.

### 3.1.2. Equipement du site en antennes RFID et leurs efficacités de détection

Pour maximiser l'efficacité de détection des passages par l'exutoire, trois antennes ont été installées dans le canal de transfert (en métal, Figure 14), une antenne dans la passe-à-poissons au niveau d'un bassin de repos, et une antenne dans le canal de décharge dont la vanne s'ouvrait très régulièrement lors des tests. La rampe à anguille a été temporairement grillagée en amont pour éviter que les smolts y rentrent (maille de grillage franchissable pour les anguilles en montaison et période du test en dehors de la période de migration des anguilles).

Toutes les antennes du site de Trois-Villes ont eu des champs de détection d'environ 60 cm de part et d'autre du plan de l'antenne (pour les marques de 23 mm). L'efficacité du dispositif de détection dans le canal de transfert (l'ensemble des 3 antennes) a été testée en lâchant i) une vingtaine de poissons les uns après les autres au début du canal (test ind20), et ii) deux groupes de 5 individus d'un coup (test gr5). Lors de ces tests, nous avons observé que les poissons peuvent s'arrêter à proximité de la première antenne et remonter le canal de transfert (le seuil de contrôle du débit de la dévalaison au-delà duquel les poissons ne peuvent plus faire demi-tour se situe au niveau de l'antenne 2). Ceci a été confirmé par les données sur la dévalaison des lots et par conséquent, les détections enregistrées sur l'antenne 1 ne sont pas prises en compte pour évaluer l'efficacité des passages.



**Figure 14** : Photos de la centrale à Trois-Villes avec l'emplacement des antennes RFID.

L'efficacité du dispositif de détection dans le canal de transfert est de 100% pour les passages individuels (Tableau 7). Quand 5 individus passent en même temps, l'efficacité de détection diminue à cause de la collision des marques dans les champs des antennes (les poissons ont été lâchés trop près des antennes lors de ces tests et n'ont pas eu le temps de s'espacer). Cependant, les retours d'expérience sur d'autres sites et nos observations *in situ* montrent que les passages de smolts dans les goulottes de dévalaison sont généralement plus espacés dans le temps que les passages en groupe simulés. Par conséquent, nous supposons que tous les individus passant par le canal de transfert ont été détectés par nos antennes.

**Tableau 7** : Efficacité de détection des antennes (en %) dans le canal de transfert sur le site de Trois-Villes (test ind20 : 20 individus lâchés un par un, test gr5 : 5 individus lâchés d'un coup).

	test ind20	test gr5-1	test gr5-2
EXU1	95	60	20
EXU2	90	20	0
EXU3	100	40	60
EXU1+2+3	100	80	60
EXU2+3	100	40	60

### 3.1.3. Protocole de marquage et de lâcher des poissons

Le marquage de tous les poissons utilisés pour les tests sur les trois sites de 2016 s'est déroulé le 29 et 30 mars 2016 à la pisciculture de Castels appartenant à l'association MIGADO. Pour rappel, 1051 poissons ont été marqués avec les marques PIT-tag de 23 mm sous anesthésie à l'eugénol, seuls 2 poissons morts ayant été observés immédiatement après le marquage (aucune mortalité différée).

Les poissons ont été transportés le 11 avril 2016, sur le site de Trois-Villes où ils ont été stockés dans un bassin circulaire (diamètre 3.5m, avec renouvellement d'eau constant, Figure 6) entre 26 et 56h

avant leur lâcher (NB : 1 poisson s’est échappé de la cuve de transport, a été remis dans le bac de stabulation mais a été retrouvé mort quelques heures plus tard). Les poissons n’ont pas été nourris pendant leur stabulation.

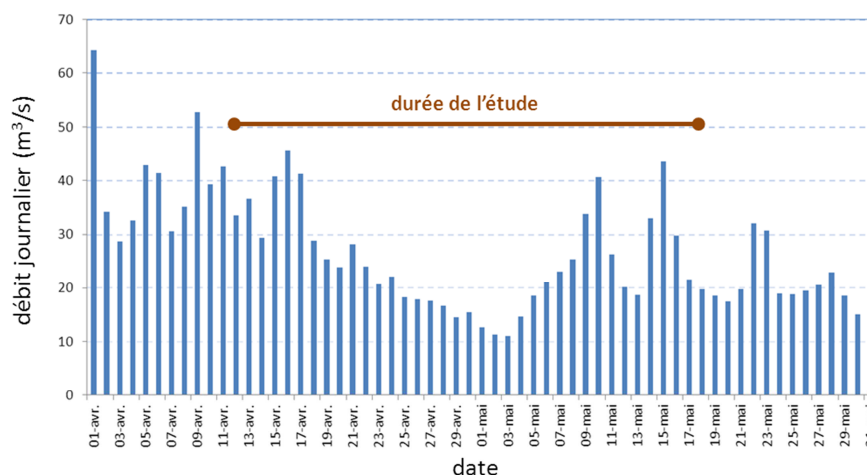
6 lots de 50 individus (pêchés au hasard dans le bac de stabulation) ont été lâchés entre 18h et minuit (Tableau 8) à environ 100 m en amont de la centrale. La taille moyenne des poissons testés sur ce site a été de 186 mm (min – max : 161 – 221mm) et a peu varié entre les lots (ANOVA,  $p > 0.05$ ). Les dispositifs ont assuré un suivi jusqu’au 18 mai 2016 (le dernier enregistrement date du 5 mai, dans la passe à poissons).

**Tableau 8 :** Nombre de poissons et leurs tailles pour chaque lot, dates et heures des lâchers sur le site de Trois-Villes (TV).

Lots	Nombre d'ind.	Date de lâcher	Heure de lâcher	Taille (mm)		
				Moyenne ±	Écart-type	Min - Max
TV_L1	50	12/04/2016	18:28 soir	187,7 ± 10,0		166 - 205
TV_L2	50	12/04/2016	22:20 nuit	186,9 ± 9,3		162 - 210
TV_L3	50	13/04/2016	00:12 nuit	185,8 ± 8,3		165 - 205
TV_L4	50	13/04/2016	18:07 soir	186,3 ± 9,4		161 - 211
TV_L5	50	13/04/2016	22:07 nuit	187,2 ± 10,6		165 - 221
TV_L6	50	13/04/2016	23:34 nuit	185,7 ± 10,6		159 - 204

### 3.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests

Durant les 5 jours suivant le premier déversement durant lesquels la quasi-totalité des poissons ont dévalé, le débit du Saison a varié entre 29 et 46  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Figure 15). La centrale de Trois-Villes a ainsi fonctionné à pleine puissance de manière stable car le débit vers la centrale est régulé par la section du canal d’amenée et par la vanne de décharge. Le débit turbiné a fait l’objet d’une mesure à l’ADCP le 19/05/2016 indiquant 3.9  $\text{m}^3/\text{s}$ , soit une valeur proche, légèrement inférieure au débit d’équipement (4.1  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Le débit dans le dispositif de dévalaison a été jaugé à cette même date indiquant 0.22  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , soit une valeur proche, légèrement supérieure à la valeur théorique (0.20  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Aucun déclenchement de l’usine n’est intervenu au cours de l’étude.



**Figure 15 :** Débit journalier du Saison à Mauléon-Licharre [Pont du collège] du 1<sup>er</sup> avril au 31 mai 2016 (source : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

## 3.2. Résultats

### 3.2.1. Efficacité de détection des antennes dans le dispositif de dévalaison

L'antenne EXU1 n'a pas été prise en compte pour le calcul de l'efficacité de passage, mais elle a quand même pu enregistrer 95,6 % de tous les passages dans le canal de transfert, autant que l'EXU2. L'antenne EXU3, quant à elle, a enregistré quasiment tous les passages (99.5 %). Ces résultats confirment les tests préliminaires (Tableau 11) montrant que l'efficacité de chaque antenne dans le canal de transfert a été très satisfaisante.

### 3.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison

Sur le site de Trois-Villes, nous avons enregistré une fraction importante des poissons déversés, en moyenne 30.7 % (min – max : 16 – 42 %, Tableau 9), qui sont passés par le canal de décharge au moment de l'ouverture de la vanne de décharge (Figure 13). Il est à noter que cette proportion varie en fonction du moment du lâcher : entre 16 – 20 % de poissons y sont détectés le soir contre 32 – 42 % la nuit selon les lots. Deux types de résultats sont présentés par la suite : tenant compte de ces passages par le canal de décharge et en les écartant. Etant donné les caractéristiques du chenal de décharge, cette voie de passage peut être considérée sans dommage pour la dévalaison des poissons.

**Tableau 9 :** Proportion des poissons détectés ou non dans les différentes voies de passage sur la centrale de Trois-Villes : a/ avec et b/ sans les individus qui sont passés par le canal de décharge (en gris : les lots lâchés le soir).

a/

LOT	Total d'ind. deversés	Nombre d'individus non détectés	Nombre d'individus détectés dans			% d'individus détectés dans			% total d'ind. passés
			exutoire	passee à poissons	canal de décharge	exutoire	passee à poissons	canal de décharge	
TV_L1	50	4	37	1	8	74	2	16	92
TV_L2	50	6	24		20	48	0	40	88
TV_L3	50	3	25	1	21	50	2	42	94
TV_L4	50	2	38		10	76	0	20	96
TV_L5	50	1	33		16	66	0	32	98
TV_L6	50	7	26		17	52	0	34	86

<b>Efficacité moyenne</b>	<b>61,0</b>	<b>0,7</b>	<b>30,7</b>	<b>92,3</b>
<b>± Ecart-type</b>	<b>12,6</b>	<b>1,0</b>	<b>10,6</b>	<b>4,6</b>

b/

LOT	Total d'ind. deversés	Nombre d'individus non détectés	Nombre d'individus détectés dans			% d'individus détectés dans			% total d'ind. passés
			exutoire	passee à poissons	canal de décharge	exutoire	passee à poissons	canal de décharge	
TV_L1	42	4	37	1		88,1	2,4		90,5
TV_L2	30	6	24			80,0	0		80,0
TV_L3	29	3	25	1		86,2	3,4		89,7
TV_L4	40	2	38			95,0	0		95,0
TV_L5	34	1	33			97,1	0		97,1
TV_L6	33	7	26			78,8	0		78,8

<b>Efficacité moyenne</b>	<b>87,5</b>	<b>1,0</b>	<b>88,5</b>
<b>± Ecart-type</b>	<b>7,5</b>	<b>1,5</b>	<b>7,6</b>

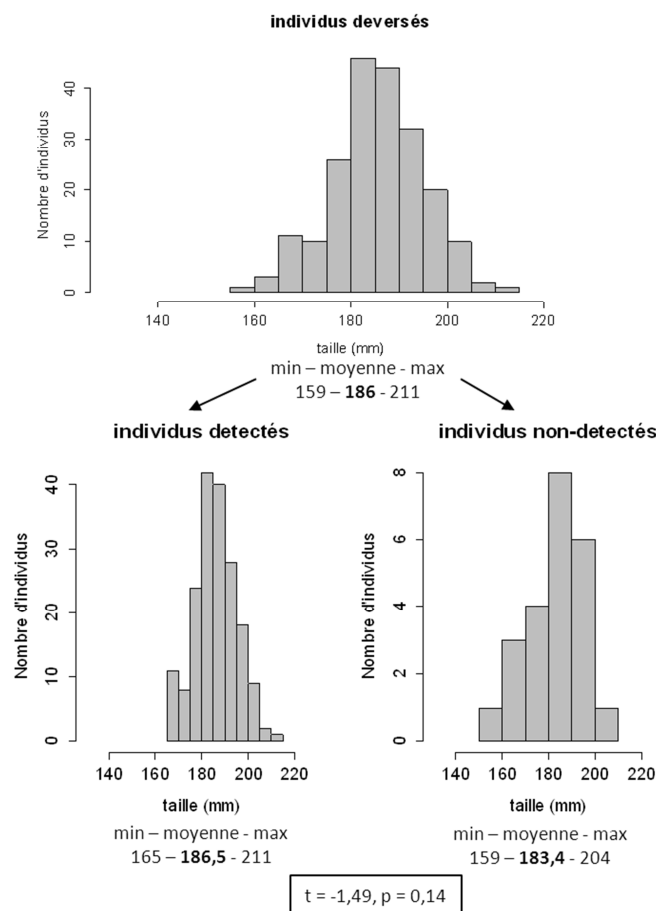


En moyenne, 61 % des poissons (min – max : 48 – 76 %, Tableau 9a) empruntent l'exutoire et le canal de transfert et 0.7 % (0 - 2%) contournent la centrale par la passe à poissons. Au total, 92.3 % (86 – 98 %) d'individus déversés ont été détectés dans une des voies de passage instrumentées (canal de transfert, passe à poissons, canal de décharge).

Si on écarte des calculs les poissons qui ont emprunté le canal de décharge (Tableau 9b), on constate qu'en moyenne 87.5% (78.8 - 97.1%) des individus ont migré par l'exutoire de dévalaison et le canal de transfert, et 1% (0 - 3.4%) par la passe à poissons. Au total, on obtient une efficacité moyenne de passage de 88.5% (78.8 - 97.1%).

### 3.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ?

Pour tester si la taille des individus a un effet sur leur voie de passage, *i.e.* si la grille bloque moins bien les plus petits individus, la différence de taille entre les individus qui ont franchi par l'exutoire et ceux qui n'ont pas été détectés a été testée avec un t-test de Student (les poissons ayant pris la passe à poissons ou le canal de décharge ont été écartés de cette analyse). La taille moyenne des poissons passés par le dispositif de dévalaison est légèrement supérieure (186.5 mm) à celle des poissons non détectés et supposés passés au travers du plan de grille (183.4 mm) ; cette différence n'est toutefois pas significative (Figure 16). Un éventuel lien entre la taille des individus et leur passage à travers la grille n'est pas confirmé sur le site de Trois-Villes.



**Figure 16 :** Distribution des tailles des individus déversés, puis des tailles des individus détectés versus non-détectés dans le canal de transfert (les individus passés par la passe à poissons ou le canal de décharge sont exclus de l'analyse).



### 3.2.4. Temps de passage

Pratiquement tous les poissons (99,6 %) qui ont pris l'exutoire et le canal de transfert ou le canal de décharge l'ont fait dans les quatre premiers jours après le premier déversement (Figure 17). 1 seul autre passage est intervenu le 5 mai.

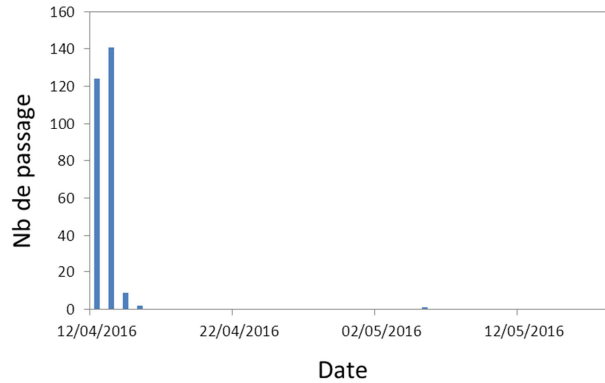


Figure 17 : Cinétique des passages sur le site de Trois-Villes.

Le temps de passage (temps entre le lâcher de chaque poisson dans le canal d'amenée et sa dernière détection dans une des voies de passage possible) a été calculé séparément pour les poissons ayant emprunté l'exutoire puis le canal de transfert ou ayant emprunté le canal de décharge.

Tableau 10 : Temps de passage des smolts pour les différents lots et les voies de passage sur le site de Trois-Villes (en gris : les lots lâchés le soir).

Exutoire et canal de transfert						
	Nb d'ind.	min	Q25	mediane	Q75	max
LOT1	37	1:08:10	3:21:13	4:24:06	7:00:07	9:45:10
LOT2	24	0:12:11	0:21:43	0:54:07	1:42:09	4:06:33
LOT3	25	0:07:12	0:11:23	0:28:17	1:21:26	5:00:13
LOT4	39	0:06:41	0:46:15	1:11:41	3:49:30	40:58:52
LOT5	33	0:04:25	0:17:55	0:24:41	0:49:04	3:08:22
LOT6	27	0:08:55	0:18:03	0:37:32	1:06:16	16:35:00
Total	185	<b>0:04:25</b>	0:24:41	<b>1:02:01</b>	<b>3:15:39</b>	40:58:52

Canal de décharge						
	Nb d'ind.	min	Q25	mediane	Q75	max
LOT1	8	2:45:05	3:11:58	3:33:18	4:21:07	6:49:54
LOT2	20	0:09:30	0:11:05	0:15:27	0:18:04	7:15:55
LOT3	21	0:03:27	0:05:49	0:10:20	0:18:12	1:23:00
LOT4	10	0:12:41	3:40:36	6:13:02	7:08:14	27:42:28
LOT5	16	0:07:39	0:22:30	0:33:22	1:32:47	23:12:45
LOT6	17	0:04:50	0:11:09	0:13:04	0:21:51	46:34:01
Total	92	<b>0:03:27</b>	0:11:06	<b>0:19:12</b>	<b>2:36:16</b>	46:34:01

Les premiers passages par le canal de transfert sont enregistrés quelques minutes (4 à 12min pour la plupart des lots, Tableau 10) après le déversement des poissons dans le canal d'amenée (à 100 m en amont de la centrale). Dans l'ensemble, 50 % des individus mettent moins d'une heure pour contourner l'usine par l'exutoire et le canal de transfert, 75 % des individus le font en moins de 3h15min. Cependant ce temps est assez variable entre les lots. Les temps de passage sont plus longs pour les lots déversés le soir (médiane 4h24min pour le lot 1 et 1h11min pour le lot 4) et beaucoup plus court si les poissons ont été lâchés la nuit (médiane entre 24 et 54min, Tableau 10).

Le temps de passage par le canal de décharge semble plus court que par l'exutoire et le canal de transfert (Tableau 10). Dans l'ensemble, la moitié des individus détectés dans le canal de décharge l'ont emprunté moins de 20 minutes après leur lâcher, 75 % d'individus en moins de 2h40 min. De nouveau, on note une différence en temps de passage entre les lots déversés le soir (médiane 3h33min pour le lot 1 et 6h13min pour le lot 4) et la nuit (entre 10 et 33min, Tableau 10).

### 3.3. Particularité du site de Trois-Villes

La configuration du site de Trois-Villes diffère des autres et cela complexifie l'analyse des résultats obtenus. En amont de la vanne de décharge (en position fermée), on retrouve une zone d'eau calme dans laquelle les poissons visiblement stabulent. Durant l'étude, le débit entrant dans le canal d'aménée étant quelque peu supérieur au débit maximum turbiné, la vanne de décharge s'ouvrait régulièrement, sur de courtes durées, les ouvertures étant brusques. Le fonctionnement de la vanne (fréquence, durée et débit transité lors des ouvertures) n'est malheureusement pas bancarisé. Au moment de l'ouverture brusque de la vanne, des poissons profitent ou se font « aspirer » dans le canal de décharge. Cette zone semble être davantage utilisée par les poissons durant la nuit au regard des passages plus importants et plus rapides qui sont enregistrés dans le canal de décharge : 32 à 42 % des individus déversés la nuit (Tableau 9). La voie de passage et le temps de passage semblent donc être influencés par le moment du lâcher.

48 poissons sur les 185 passés par l'exutoire et le canal de transfert (26 %) sont entrés dans la goulotte de dévalaison (détection à l'antenne 1), puis en sont ressortis (seuil de contrôle du débit positionné au niveau de l'antenne 2) et sont enfin entrés de nouveau quelques minutes ou heures plus tard pour l'emprunter. De plus, 8 autres poissons sont entrés dans la goulotte jusqu'à l'approche du seuil de contrôle (détection aux antennes 1 et 2), mais en sont ressortis, puis ont été enregistrés dans le canal de décharge. Cela indique une certaine réticence des smolts pour s'engager dans le canal de transfert, l'accélération du courant au niveau du seuil et la turbulence plus importante à cet endroit-là en sont probablement responsables puisqu'elles ont été souvent citées comme sources de réticences pour les poissons en dévalaison (Brett & Alderdice, 1958; Travade & Larinier, 1992; Nyqvist *et al.*, 2016). L'apparition de ces réticences est probablement favorisée par la faible valeur du débit de dévalaison (en lien avec la petite taille de la prise d'eau) et les faibles dimensions du seuil de contrôle du débit qui en découlent (largeur de 0.5 m et charge sur la crête de déversement de 0.35 m). Ces réticences ne remettent toutefois pas en cause l'atteinte d'une efficacité élevée.

## 4. Test sur la centrale hydroélectrique de Gotein

### 4.1. Méthodologie

#### 4.1.1. Sites d'étude

La centrale hydroélectrique de Gotein (Figure 18), sur la commune du même nom (département 64), se situe en dérivation de la rivière Saison (débit moyen  $22.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  au niveau du site) et présente un long canal d'amenée de 770 m. Son débit d'équipement est de  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ; la vitesse d'approche est de  $0.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le plan de grille, incliné à  $26^\circ$  avec un espacement inter barreaux de 20 mm, possède deux exutoires à son sommet, chacun de 0.8 m de large et 0.5 m de profondeur. Un exutoire est central et l'autre est positionné en rive droite. Le débit total alloué à la dévalaison par le canal de transfert est de  $0.38 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et correspond à 5.7% du débit maximal turbiné. La vitesse en entrée de l'exutoire est de  $0.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le site est équipé d'une passe à ralentisseurs et d'une rampe à anguilles. Il existe également au niveau de l'usine un seuil de décharge qui n'a pas été déversant pendant l'étude.

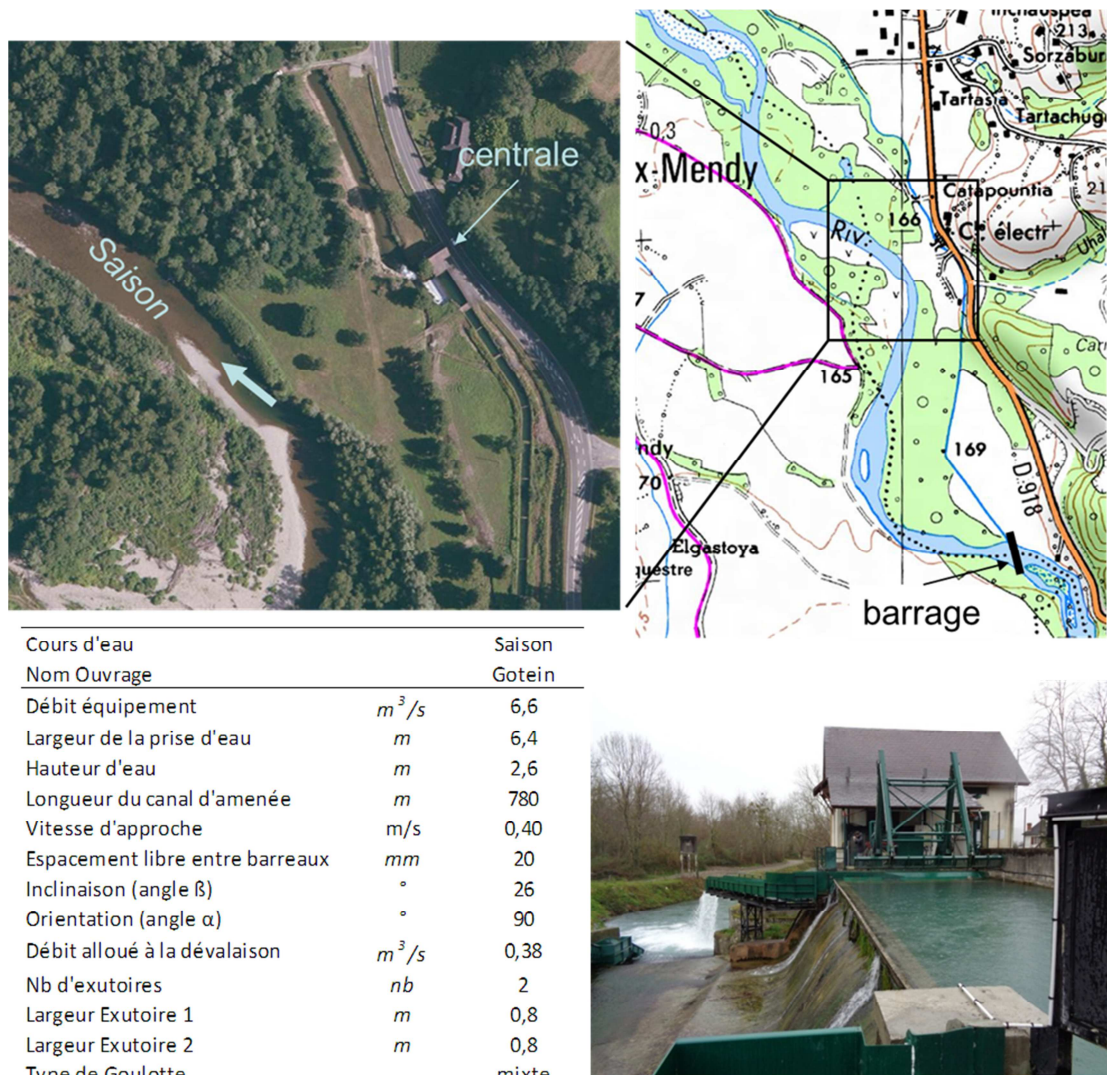
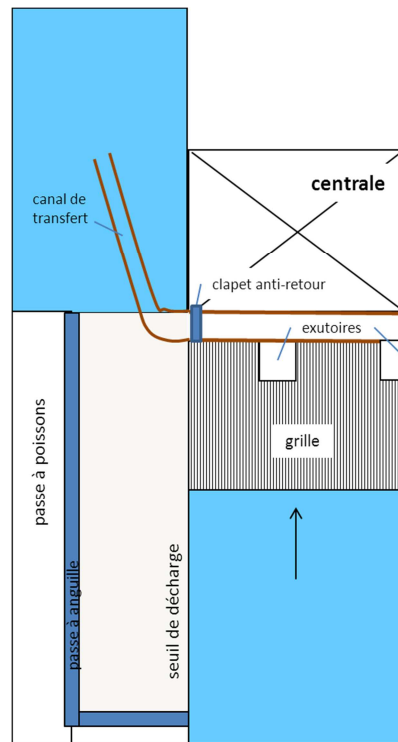


Figure 18 : Localisation et principales caractéristiques de l'aménagement de Gotein sur le Saison.



**Figure 19** : Schéma de la centrale hydroélectrique de Gotein.

#### 4.1.2. Equipement du site en antennes RFID et efficacités de détection

Pour maximiser l'efficacité de détection des passages par les exutoires, trois antennes ont été installées dans le canal de transfert (en métal) et une antenne a été installée dans la passe à poissons au niveau d'un bassin de repos (Figure 20). La rampe à anguille a été temporairement grillagée en amont pour éviter que les smolts y rentrent (maille franchissable pour les anguilles en montaison et période du test en dehors de la période de migration des anguilles). La détection des antennes dans le canal de transfert, toutes situées à l'aval du seuil de contrôle du débit au-delà duquel les poissons ne peuvent plus faire demi-tour, a pu couvrir l'intégralité du canal (6 m de longueur). L'antenne dans la passe à poissons a eu un champ de détection d'environ 60 cm de part et d'autre du plan de l'antenne. L'efficacité du dispositif de détection dans le canal de transfert (l'ensemble des 3 antennes) a été testée en lâchant i) une vingtaine de poissons les uns après les autres au début du canal (à l'aval du seuil de contrôle, test ind20), et ii) deux groupes de 5 individus (test gr5). L'efficacité de détection est de 100% pour les passages individuels (Tableau 11). Quand un groupe de 5 individus passe, l'efficacité de détection de chaque antenne diminue (à cause de la collision des marques) mais le résultat après agrégation des détections des trois antennes reste très satisfaisant. Par conséquent, nous supposons que tous les individus passant par le canal de transfert ont été détectés par nos antennes.

**Tableau 11** : Efficacité (%) de détection des antennes dans le canal de transfert sur le site de Gotein (test ind20 : 20 individus lâchés un par un, test gr5 : 5 individus lâchés d'un coup).

	test ind20	test gr5-1	test gr5-2
EXU1	100	80	80
EXU2	100	80	60
EXU3	100	40	100
EXU1+2+3	100	80	100



**Figure 20** : Photos de la centrale hydroélectrique de Gotein avec l'emplacement des antennes RFID.

#### 4.1.3. Protocole de marquage et de lâcher des poissons

Le marquage de tous les poissons utilisés pour les tests sur les trois sites de 2016 s'est déroulé le 29 et 30 mars 2016 à la pisciculture de Castels appartenant à l'association MIGADO. Pour rappel, 1051 poissons ont été marqués avec les marques PIT-tag de 23 mm sous anesthésie à l'eugénol, 2 mortalités ont été constatées immédiatement après le marquage (aucune mortalité différée). Les poissons ont été transportés le 11 avril 2016, sur le site de Trois-Villes où ils ont été stockés dans un bassin circulaire (diamètre de 3.5 m, avec renouvellement d'eau constant, Figure 6) entre 26 et 56h avant leur lâcher (*NB : 1 poisson s'est échappé de la cuve de transport puis a été remis dans le bac de stabulation mais a été retrouvé mort quelques heures plus tard*). Les poissons n'ont pas été nourris pendant leur stabulation.

6 lots de 50 à 52 individus (sélectionnés au hasard) ont été lâchés entre 18h et environ minuit (Tableau 12) à environ 100 m en amont de la centrale. La taille moyenne des poissons testés sur ce site est de 187 mm (min - max : 150 - 220mm) et varie peu entre les lots (ANOVA,  $p > 0.05$ ). Les dispositifs ont été en place pour le suivi jusqu'au 18 mai 2016 (le dernier enregistrement date du 20 avril dans le canal de transfert).

**Tableau 12** : Nombre de poissons et leurs tailles pour chaque lot, dates et heures des lâchers sur le site de Gotein (GOT).

Lots	Nombre d'ind.	Date de lâcher	Heure de lâcher	Taille (mm)		
				Moyenne ±	Écart-type	Min - Max
GOT_L1	50	12/04/2016	19:45 soir	188,0 ± 8,0		171 - 202
GOT_L2	50	12/04/2016	22:40 nuit	188,0 ± 11,4		158 - 212
GOT_L3	50	13/04/2016	00:40 nuit	186,5 ± 10,9		155 - 211
GOT_L4	50	13/04/2016	18:37 soir	186,8 ± 12,6		152 - 209
GOT_L5	50	13/04/2016	22:38 nuit	185,0 ± 11,9		150 - 213
GOT_L6	52	14/04/2016	00:17 nuit	186,1 ± 11,6		165 - 220



#### 4.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests

Durant les 5 jours suivant le premier déversement durant lesquels la quasi-totalité des poissons ont dévalé, le débit du Saison a varié entre 29 et 46 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (Figure 15). La centrale de Gotein a ainsi fonctionné à pleine puissance de manière stable car le débit vers la centrale est régulé en entrée du canal d'amenée. Le débit turbiné a fait l'objet d'une mesure à l'ADCP le 19/05/2016 indiquant 6.7 m<sup>3</sup>/s, soit une valeur très proche du débit d'équipement (6.6 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Le débit dans le dispositif de dévalaison a été jaugé à cette même date indiquant 0.35 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, soit une valeur proche, légèrement inférieure à la valeur théorique (0.38 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). Aucun déclenchement de l'usine n'est intervenu au cours de l'étude.

## 4.2. Résultats

### 4.2.1. Efficacité de détection des antennes dans le dispositif de dévalaison

Supposant que l'ensemble des trois antennes dans le canal de transfert a détecté 100 % de passages par l'exutoire, les antennes EXU1, EXU 2 et EXU 3 ont respectivement eu des efficacités de détection de 88.5 %, 99.2 % et 92.9 %. Cela confirme que l'efficacité de chaque antenne a été très satisfaisante comme l'ont montré les premiers tests (Tableau 11).

### 4.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison

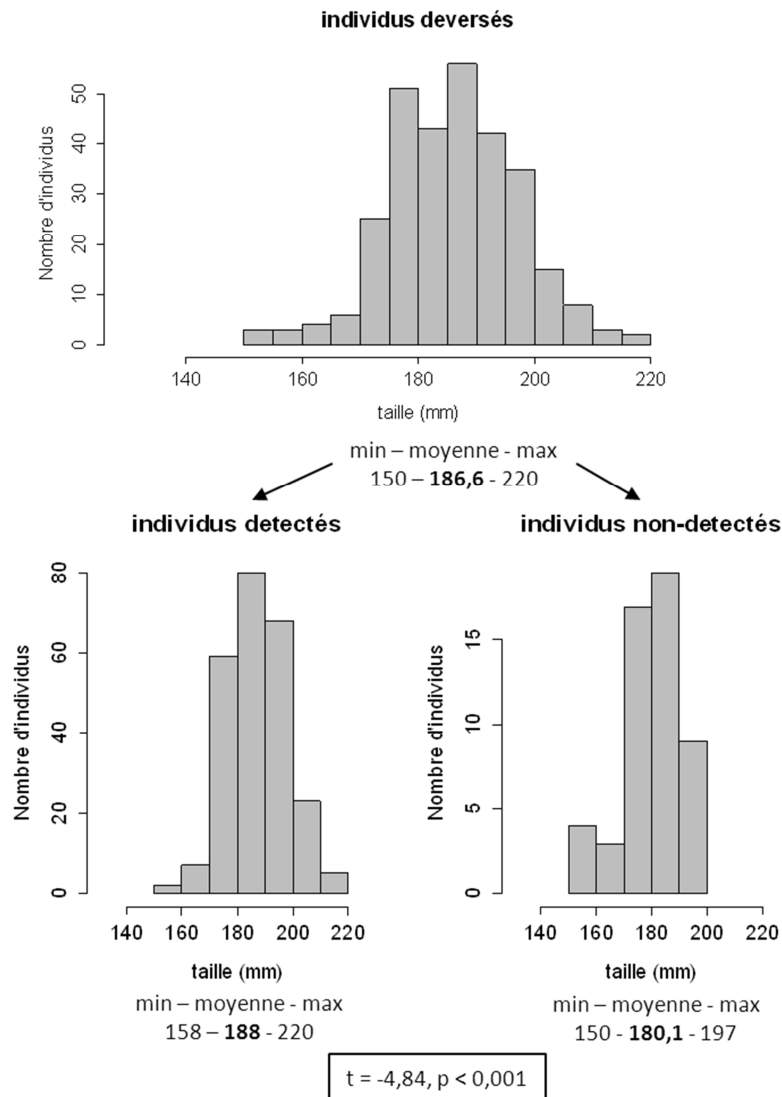
En moyenne, 80.9 % (min – max : 71.2 – 100 %, Tableau 13) des poissons ont emprunté les exutoires et le canal de transfert et 2 % (0-5.8 %) d'entre eux ont utilisé la passe à poissons. Au total, on obtient une efficacité moyenne de passage de 82.8 % (72-100 %). Il est à noter que les efficacités de passage sont systématiquement supérieures pour les poissons lâchés le soir : la différence entre les lots lâchés le soir et ceux lâchés la nuit est de 13 à 22 % (avec une différence moyenne à 18.2 %).

**Tableau 13** : Nombre et proportion des poissons détectés ou non dans les différentes voies de passage sur le site de Gotein (en gris : les lots lâchés le soir).

LOT	Total d'ind. deversés	Nombre d'individus non détectés	Nbd'individus détectés dans		% d'individus détectés dans		% total d'ind. passé
			exutoires	passe à poissons	exutoires	passe à poissons	
GOT_L1	50	0	50		100	0	100
GOT_L2	50	11	38	1	76	2	78
GOT_L3	50	10	39	1	78	2	80
GOT_L4	50	5	44	1	88	2	90
GOT_L5	50	14	36		72	0	72
GOT_L6	52	12	37	3	71,2	5,8	76,9
<b>Efficacité moyenne</b>					<b>80,9</b>	<b>2,0</b>	<b>82,8</b>
<b>± Ecart-type</b>					<b>11,2</b>	<b>2,1</b>	<b>10,3</b>

### 4.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ?

L'éventuelle différence de taille entre les individus ayant emprunté avec succès les exutoires/canal de transfert et ceux n'ayant pas été détectés (supposés passés au travers du plan de grille dans la turbine) a été testée avec un t-test de Student (les poissons ayant pris la passe à poissons ont été écartés de cette analyse). La taille moyenne des poissons passés par le dispositif de dévalaison est légèrement supérieure (188 mm) à celle des poissons non détectés (180.1 mm) et cette différence s'avère significative ( $t = -4.84$ ,  $p < 0.05$ , Figure 21). Un lien entre la taille des individus et leur passage à travers la grille est détecté sur le site de Gotein.

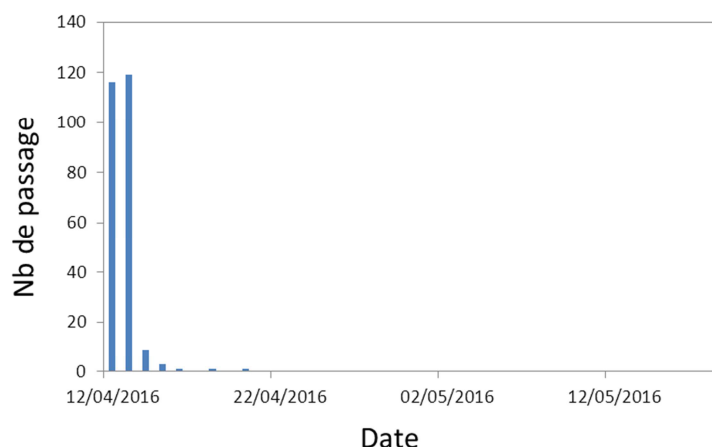


**Figure 21 :** Distribution des tailles des individus déversés, puis des tailles des individus détectés versus non-détectés dans le canal de transfert (les individus passés par la passe à poissons sont exclus de l'analyse).

### 4.2.4. Temps de passage

98.8% des poissons qui ont emprunté l'exutoire et le canal de transfert l'ont fait dans les quatre premiers jours suivant le premier déversement (Figure 22). 3 autres passages sont intervenus plus tardivement : le 16, le 18 et le 20 avril.





**Figure 22** : Cinétique des passages sur le site de Gotein.

Les premiers passages par le canal de transfert ont été enregistrés quelques minutes (entre 3 et 8min pour tous les lots, Tableau 14) après le déversement des poissons dans le canal d’amenée (à 100 m en amont de la centrale). Dans l’ensemble, 50 % des individus mettent moins de 20 minutes pour contourner l’usine en empruntant les exutoires et le canal de transfert, 75 % des individus le font en moins de 1h08min. Bien qu’il existe une certaine variabilité entre les lots comme pour les sites analysés dans les parties précédentes, celle-ci paraît moindre sur le site de Gotein. En revanche, les temps de passage sont de nouveau plus longs pour les lots déversés le soir (médiane de 51 min pour le lot 1 et de 37min pour le lot 4) que pour les lots déversés la nuit (médiane entre 11 et 20 min, Tableau 14).

**Tableau 14** : Temps de passage des smolts pour les différents lots sur le site de Gotein (en gris : les lots lâchés le soir).

	Nb d'ind.	min	Q25	mediane	Q75	max
LOT1	50	0:06:35	0:14:48	0:51:29	1:57:16	187:33:21
LOT2	38	0:08:17	0:13:51	0:20:32	0:41:12	6:05:32
LOT3	39	0:03:25	0:07:02	0:11:53	0:19:57	1:31:24
LOT4	44	0:05:31	0:18:17	0:37:19	1:25:03	44:48:44
LOT5	36	0:03:47	0:10:56	0:19:45	0:53:25	52:22:36
LOT6	37	0:05:55	0:13:00	0:18:27	0:35:38	108:06:54
Total	244	<b>0:03:25</b>	0:12:05	<b>0:19:59</b>	<b>1:08:13</b>	187:33:21

### 4.3. Particularité du site de Gotein

L’efficacité de passage semble bien plus supérieure pour les lots lâchés le soir que pour les lots lâchés la nuit, ce qui n’est pas le cas sur les autres sites. Nous ne trouvons pas d’explication à cette observation qui est à prendre avec précaution compte tenu de faible nombre des lots du soir. Il peut s’agir d’un effet de hasard.

Comme sur le site d’Halsou, lors du déclenchement du dégrilleur la nuit, une observation ponctuelle a permis de voir qu’un poisson qui stationnait au sommet de la grille (non plaqué) s’est fait emmener dans le canal de transfert par le dégrilleur, vraisemblablement en bon état. Ce type de transfert reste cependant très occasionnel (1 seul constat de notre part et peu de déclenchement du dégrilleur durant les temps de passage des smolts).

Dans le cadre de la présente étude, 9 individus sur les 300 déversés à Trois-Villes ont également été enregistrés lors de leur passage par l’exutoire à Gotein. Ce taux d’entraînement faible dans la prise d’eau de Gotein est certainement lié aux forts débits du Saison durant les premiers jours de l’expérimentation (de l’ordre de 35 m<sup>3</sup>/s, soit plus 1.5-1.6 fois le module), le débit d’équipement de

la centrale ne représentant alors qu'environ 20% du débit total. Les deux centrales de Trois-Villes et Gotein sont éloignées de 7.2 km et ce tronçon est sans obstacle hormis le barrage de la centrale de Gotein. Le temps moyen mis par les poissons pour parcourir cette distance est de 1h21min (min - max : 1h09min – 1h40min, Tableau 15). Si on déduit de ce temps, le temps médian de retard à Gotein (20min, Tableau 14) et on le divise par la distance entre les deux sites, on devrait approcher la valeur de la vitesse de déplacement des smolts en dévalaison. En moyenne, les smolts parcourent un kilomètre en 8min28sec (min - max : 7 - 11min ; écart-type :  $\pm 1\text{min}23\text{s}$ ), ce qui revient à une vitesse moyenne de près de  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ou  $7.3\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (min - max :  $5.4 - 8.8\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  ; écart-type :  $1.1\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Il y a une certaine variabilité individuelle entre les vitesses de déplacement des 8 poissons, mais qui est assez réduite (faibles écart-types).

**Tableau 15 :** Temps mis à parcourir la distance entre le site de Trois-Villes et de Gotein et la vitesse de dévalaison pour les neuf individus passés au deux sites.

N° de poissons	lot	temps depuis le lâcher		temps de trajet entre TV et GOT	temps de retard à Gotein	vitesse (min/km)	vitesse (km/heure)
		Sorti de Trois Villes (TV)	Arrivée à Gotein (GOT)				
000000008A1F833	TV_L1	3:33:09	5:13:02	1:39:53	(-20min)	0:11:06	5,4
8000E13515DC6DFB	TV_L1	3:53:04	5:12:47	1:19:43	(-20min)	0:08:18	7,2
000000008A1F85E	TV_L2	0:16:34	1:47:55	1:31:21	(-20min)	0:09:55	6,1
8000E13515DC6E7C	TV_L2	0:15:27	1:37:42	1:22:15	(-20min)	0:08:39	6,9
000000008A1F83D	TV_L3	5:00:13	6:23:45	1:23:32	(-20min)	0:08:49	6,8
8000E13515DC6DD0	TV_L4	7:21:46	8:32:25	1:10:39	(-20min)	0:07:02	8,5
8000E13515DC6DBA	TV_L5	0:07:46	1:27:07	1:19:21	(-20min)	0:08:15	7,3
000000008A1F62A	TV_L6	0:11:16	1:20:10	1:08:54	(-20min)	0:06:48	8,8
8000E13515DC6E9B	TV_L6	1:06:17	2:19:02	1:12:45	(-20min)	0:07:20	8,2
			moyenne	1:20:56		0:08:28	7,3
			$\pm$ écart-type	0:09:59		0:01:23	1,1
			min	1:08:54		0:06:48	5,4
			max	1:39:53		0:11:06	8,8

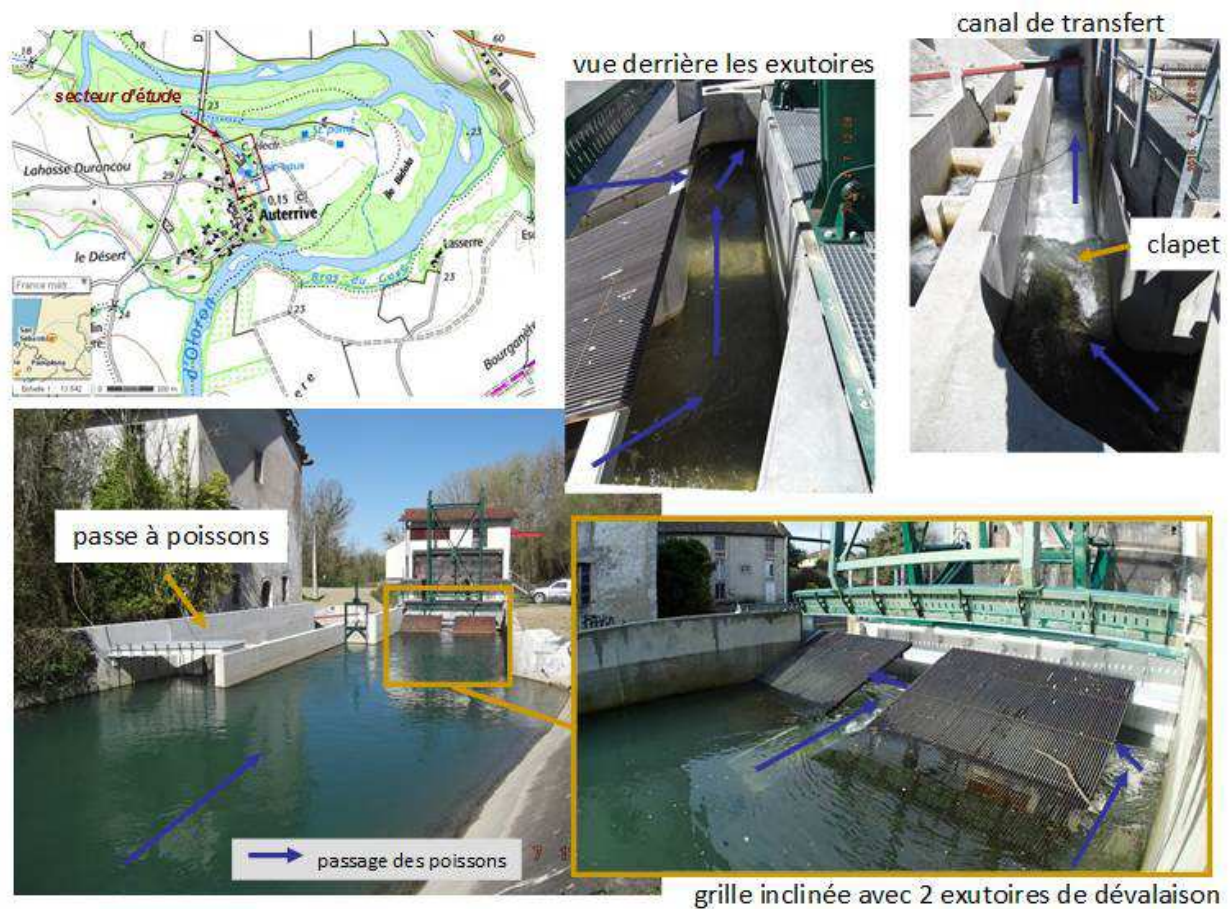
## 5. Rappel du test sur la centrale hydroélectrique d'Auterrive (2015)

### 5.1. Méthodologie

#### 5.1.1. Site d'étude

En 2015, le test d'efficacité du dispositif de dévalaison a été réalisé pour les smolts de saumon atlantique au niveau de l'aménagement d'Auterrive sur le Gave d'Oloron (département 64). Les résultats détaillés sont disponibles dans Tomanova et al. (2015). Un rappel de l'étude est présenté ici. L'aménagement se situe en dérivation du Gave d'Oloron (Figure 23), au bout d'un canal d'amenée de 400 m de long. Le débit maximum turbiné à la centrale d'Auterrive est de  $9.5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . La prise d'eau présente une largeur de 6.0 m. La vitesse d'approche varie entre 0.44 et  $0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  selon le niveau d'eau amont qui n'est pas régulé. La prise d'eau est équipée d'un plan de grille incliné à  $26^\circ$ , avec une vitesse normale maximale de  $0.29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'espacement libre entre barreaux est de 20 mm. Deux exutoires sont positionnés au sommet du plan de grille, un premier attenant à la rive droite de 0.5 m de large et un second à peu près au centre de la prise d'eau de 0.7 m de large. Le plan de grille est obturé entre les exutoires sur la même profondeur. La hauteur d'eau dans les exutoires varie entre 0.5 et 1.2 m selon le niveau d'eau amont. Le débit total des exutoires est régulé par un clapet à hauteur de  $0.5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , soit 5.3% du débit maximum turbiné (6.5% au moment du test). La vitesse

moyenne en entrée des exutoires varie entre 0.35 et 0.83 m.s<sup>-1</sup> selon le niveau d'eau amont. Le débit des exutoires est collecté par un canal de transfert commun pour l'évacuation des poissons et des dégrillats.

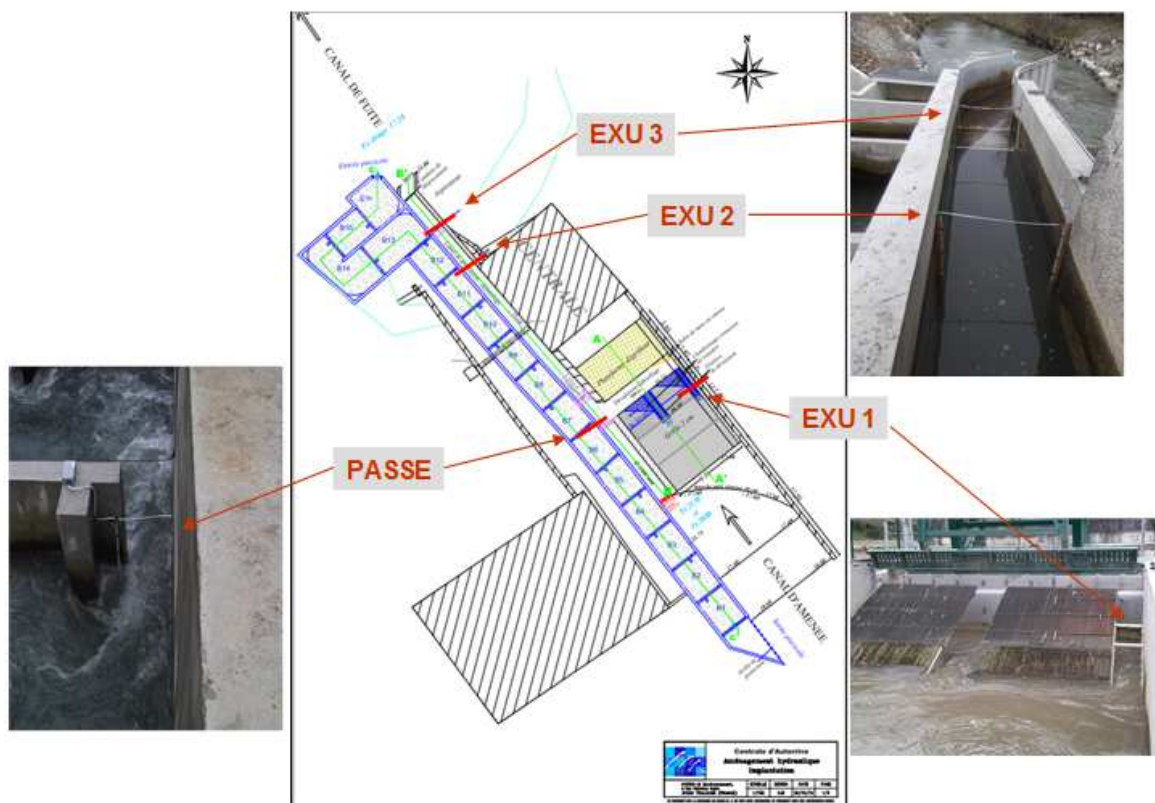


**Figure 23** : Localisation et aperçus du site d'étude, grille inclinée avec des exutoires et canal de transfert.

### 5.1.2. Equipement du site en antennes RFID et efficacités de détection

Quatre antennes ont été installées dans le cadre de cette étude (Figure 24) :

- une dans la passe à poissons (appelée PASSE) au niveau de la 7<sup>ème</sup> échancrure depuis l'amont, pour vérifier si les poissons en dévalaison l'empruntent et dans quelle proportion. Le champ de détection y est de 40 cm de part et d'autre de l'antenne (mesuré au centre de l'antenne pour des marques de 12 mm) ;
- deux dans le canal de transfert (EXU2 et EXU3), à l'aval du clapet contrôlant le débit total des deux exutoires et formant une chute infranchissable à la remontée. Les champs de détection sont de 40 cm de part et d'autre pour l'EXU2 et 60 cm de part et d'autre pour l'EXU3 ;
- une au niveau de l'entrée de l'exutoire rive droite (EXU1). Cette antenne, du fait de son installation inclinée (présentation des marques non optimale par rapport au plan de l'antenne) et dans un environnement métallique (plan de grille, goulotte), présente une efficacité moindre avec un champ de détection de 30 cm de part et d'autre. Les observations ont montré qu'un poisson peut être détecté au niveau de cette antenne sans passer définitivement par l'exutoire (passage uniquement devant ou incursion et sortie de l'exutoire). Cette antenne a permis d'obtenir des informations sur la présence de poissons prospectant à l'amont du plan de grille.



**Figure 24** : Plan de la centrale avec ses dispositifs de franchissement et localisation des 4 antennes de détection (source du plan : HYDRO-M).

### 5.1.3. Marquage et lâcher des poissons

Les smolts de saumon atlantique en provenance de la pisciculture de Castels appartenant à l'association MIGADO, marqués avec des marques de type PIT de 12 et 23 mm, ont été relâchés en 5 lots entre le 7 et le 10 avril 2015 à différents horaires (Tableau 16) au niveau du pont qui se trouve à environ 100 m en amont de la prise d'eau (Figure 23). Les poissons marqués ont mesuré entre 137 et 225 mm, en moyenne 184.7 mm. L'enregistrement des passages a été poursuivi jusqu'au 27 mai 2015, plus d'un mois et demi après le dernier lâcher.

## 5.2. Résultats

### 5.2.1. Efficacité de détection des antennes du canal de transfert

En faisant l'hypothèse que les deux antennes ont détecté tous les individus passés dans le canal de transfert, les efficacités de chacune des antennes EXU2 et EXU3 ont été très satisfaisantes avec respectivement 90.7 % et 98%.

### 5.2.2. Efficacité de passage par le dispositif de dévalaison

En moyenne 80.7 % des smolts (min - max : 75.5 – 89.2 %, Tableau 16) ont dévalé par les exutoires et le canal de transfert, et 3.8 % ont emprunté la passe à poissons. En additionnant les passages par la passe à poissons et par les exutoires de dévalaison, on obtient une efficacité globale moyenne de 84.5 % (min - max : 75.5 – 91.9 %).



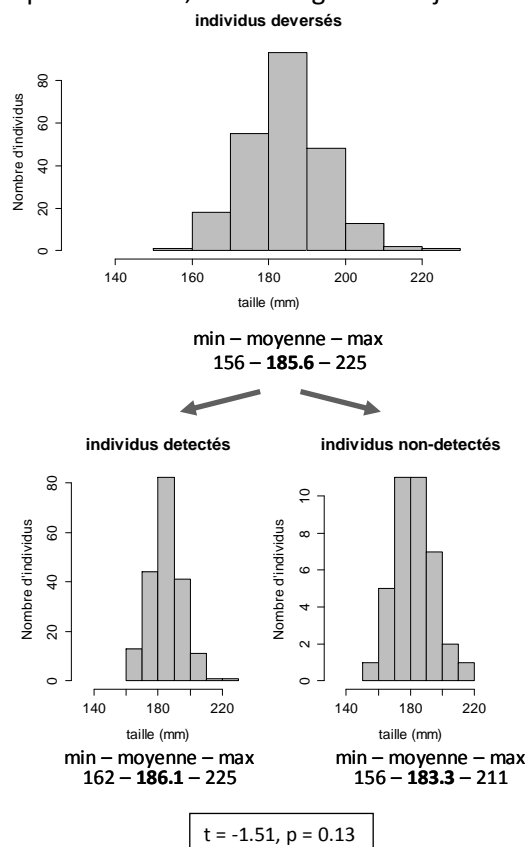
**Tableau 16** : Proportion des poissons (%) détectés ou non dans les différentes voies de passage sur le site d'Auterrive (en gris : les lots lâchés durant la journée).

Lots	Nombre d'ind.	Date de lâcher	Heure de lâcher	Proportion (%) d'individus détectés dans			
				non-détectés	exutoire	passé	exutoire + passé
LOT1	37	07/04/2015	20:20 soir	8,1	89,2	2,7	<b>91,9</b>
LOT2	59	08/04/2015	14:48 après-midi	11,9	84,7	3,4	<b>88,1</b>
LOT3	47	09/04/2015	21:21 nuit	17,0	76,6	6,4	<b>83,0</b>
LOT4	49	09/04/2015	23:28 nuit	24,5	75,5	0,0	<b>75,5</b>
LOT5	47	10/04/2015	10:25 matin	14,9	78,7	6,4	<b>85,1</b>

<b>moyenne des lots</b>	<b>15,5</b>	<b>80,7</b>	<b>3,8</b>	<b>84,5</b>
-------------------------	-------------	-------------	------------	-------------

### 5.2.3. L'efficacité du dispositif est-elle liée à la taille des poissons ?

Pour tester si la taille des poissons a une influence sur l'efficacité de la grille à protéger les poissons contre les passages par la turbine, la différence de taille entre les individus ayant emprunté les exutoires et ceux qui n'ont pas été détectés, a été testée avec un t-test de Student (les poissons ayant emprunté la passe à poissons ont une nouvelle fois été écartés de cette analyse). La taille moyenne des poissons passés par le dispositif de dévalaison (186.1 mm) est légèrement supérieure à celle des poissons non détectés donc probablement passés au travers du plan de grille (183.3mm) ; cette différence n'étant toutefois pas significative ( $p > 0.05$ , Figure 25). Un éventuel moindre effet répulsif de la grille pour les plus petits individus testés dans cette étude n'a pas été prouvé sur ce site. Ce résultat est toutefois à considérer avec prudence étant donné que les smolts d'élevage utilisés présentent des tailles peu variables, avec une grosse majorité mesurant entre 17 et 20 cm.



**Figure 25** : Distribution des tailles des individus déversés, puis des tailles des individus détectés versus non-détectés dans le canal de transfert (les individus ayant pris la passe à poissons ont été écartés de cette analyse).

#### 5.2.4. Temps de passage

On définit le temps de passage pour chaque individu ayant emprunté le dispositif de dévalaison comme la différence entre l'heure du lâcher et l'heure de la dernière détection dans le canal de transfert (EXU3 ou EXU2). Pour l'ensemble des lots, on constate que 50% des poissons ont mis moins de 23 minutes depuis leur lâcher pour franchir l'ouvrage par le dispositif de dévalaison et que 75% des individus l'ont fait en moins de 2 heures (Tableau 17). Plutôt exceptionnellement, certains individus ont mis plusieurs heures, et jusqu'à deux jours pour franchir l'ouvrage par les exutoires. Pour les lots déversés l'après-midi, le soir et la nuit, les valeurs médianes des temps de passage sont assez proches, entre 18 et 21 minutes. Pour le lot du matin, les temps de passage sont bien plus élevés (3h17min pour le lot 5).

**Tableau 17** : Temps de passage des smolts (entre le lâcher et la sortie du dispositif de dévalaison) en fonction des lots sur le site d'Auterrive (en gris : les lots lâchés à la lumière du jour).

	Nb d'ind.	min	Q25	mediane	Q75	max	Efficacité (%)
group 1	33	0:11:03	0:14:59	<b>0:18:47</b>	0:23:12	0:58:55	91,9
group 2	50	0:07:47	0:13:53	<b>0:18:29</b>	0:31:51	46:13:00	88,1
group 3	36	0:12:49	0:15:05	<b>0:20:04</b>	0:39:47	5:46:54	83,0
group 4	37	0:11:50	0:15:33	<b>0:21:36</b>	0:54:26	47:00:00	75,5
group 5	37	0:12:43	2:28:12	<b>3:17:00</b>	6:37:06	54:18:34	85,1
Total	193	<b>0:07:47</b>	<b>0:15:33</b>	<b>0:22:24</b>	<b>1:51:50</b>	<b>54:18:34</b>	

#### 5.3. Particularité du site d'Auterrive

Nos observations de la courantologie et du comportement des smolts au niveau de la prise d'eau d'Auterrive suggèrent que le positionnement des exutoires n'y est pas optimal. Cela est lié à l'hétérogénéité des écoulements à l'approche du plan de grille, spécifique au site d'étude, non anticipée lors du projet. Du fait d'un léger angle de la prise d'eau par rapport à l'axe du canal d'aménée, l'écoulement principal arrive le long de la berge rive droite. Cela engendre des vitesses transversales au sommet du plan de grille allant de la rive droite vers la rive gauche, avec la formation d'une zone de recirculation en rive gauche. L'attractivité de l'exutoire de la rive droite est ainsi assez limitée. Suite à cette première étude et le retour d'expérience, on retient qu'une attention particulière doit être portée sur la courantologie en amont de la grille pour bien positionner les exutoires et garantir un bon fonctionnement du dispositif de dévalaison.



## 6. Bilan des études et discussion

### 6.1. Sites d'étude

L'efficacité d'un plan de grille à faible espacement inter barreaux (20 mm), incliné ou orienté, associé à un ou plusieurs exutoires et un canal de transfert, a été testée sur 4 centrales hydroélectriques de petite à moyenne taille (débit turbiné au moment des tests de 3.9 à 23.8 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Tableau 19). Trois des sites d'étude sont équipés d'un plan de grille incliné et l'un des sites d'un plan de grille orienté. Le débit dans le dispositif de dévalaison se situe entre 5 et 6.4 % du débit turbiné durant les études. La vitesse d'entrée dans les exutoires varie entre 0.35 et 1.4 m.s<sup>-1</sup> avec une profondeur toujours supérieure ou égale à 50 cm. Tous les dispositifs ont été testés avec le même protocole d'étude utilisant les smolts de saumon atlantique de tailles comparables.

### 6.2. Efficacité de passage par les dispositifs de dévalaison

Les tests des dispositifs de dévalaison montrent une efficacité moyenne de passage par les exutoires supérieure à 80 % sur tous les sites (min – max : 80.7 – 87.5 %, Tableau 19). On observe certes une certaine variabilité en fonction des lots testés, mais l'efficacité n'est jamais inférieure à 70%. En y ajoutant les quelques passages détectés dans les autres voies possibles de dévalaison sans dommage sur les sites d'étude (passe à poissons, canal de décharge), on obtient un taux de transfert moyen entre 82.9 et 92.3 % (min – max des lots de test : 72 – 100 %). Ce résultat est satisfaisant de par sa relative stabilité entre les sites et les lots du test et ce d'autant qu'il s'agit d'une efficacité minimale, le taux réel d'entraînement dans les turbines n'étant pas mesuré directement dans nos études.

**Tableau 18** : Sites de test, résumé de leurs caractéristiques principales et la taille des smolts de saumon atlantique utilisés.

Site (cours d'eau)	Centrale			Plan de grille					Exutoire de dévalaison					Taille des poissons testés (mm)		
	Canal d'aménée (m)	Débit turbiné $Q_{TURB}^*$	Vitesse d'approche *	Inclinaison	Orientation	Surface mouillée	Vitesse normale*	Espacement entre barreaux	Nombre	Débit d'alimentation	Largeur en entrée	Profondeur en entrée	Vitesse en entrée			
	(m)	( $m^3/s$ )	(m/s)			( $m^2$ )	(m/s)	(mm)		( $m^3/s$ )	(% de $Q_{TURB}$ )*	(m)	(m)	(m/s)	Moyenne	min-max
Auterrive (Gave d'Oloron)	400	7.8 (9.5)	0.36 - 0.45 (0.44 - 0.55)	26°	90°	32,5	0.24 (0.29)	20	2	0,50	6.4% (5.3%)	0.5 + 0.7	0.5 - 1.2	0.35 - 0.83	184.7	137 - 225
Trois-Villes (Saison)	550	3.9 (4)	0.37 (0.38)	26°	90°	24,8	0.16 (0.16)	20	1	0,20	5.1% (4.9%)	1,0	0,5	0,4	186.6	161 - 221
Gotein (Saison)	780	6.7 (6.7)	0.40 (0.40)	26°	90°	27,5	0.24 (0.24)	20	2	0,38	5.7% (5.7%)	0.8 + 0.8	0,5	0,47	186.7	150 - 220
Halsou (Nive)	925	20 - 23.8 (30)	0.6 - 0.72 (0.91)	64°	15° (en alignement de berge)	76	0.26 - 0.31 (0.39)	20	1	1 - 1.5	5% (5%)	1,38	≥ 0.5	0.7-1.4	185.4	137 - 213

\* valeur moyenne (maximale)

\*\* valeur au cours de l'étude (valeur de l'autorisation administrative)

**Tableau 19** : Efficacités de passage par l'exutoire du plan de grille et le canal de transfert vers l'aval, et taux de transfert global des poissons (incluant les autres voies de passage présentes sur l'aménagement) sur les quatre sites d'étude. \*les résultats pour la centrale d'Halsou sont présentés avec et sans lot1.

Site	Efficacité grille/exu (%)			Taux de transfert global (%) sur l'aménagement		
	moyenne	écart-type	min-max	moyen	écart-type	min-max
Auterrive	80.7	5.8	75.5 – 89.2	84.5	6.1	75.5 – 91.9
Trois-Villes	87.5	7.5	78.8 - 97.1	92.3	4.6	86 – 98
Gotein	80.9	10.2	71.2 – 100	82.8	10.3	72-100
Halsou*	84.5-87	5.8-8	72 – 94.4	84.5-87	5.8-8	72 – 94.4

### 6.3. L'efficacité du dispositif de dévalaison est-elle liée à la taille des poissons ?

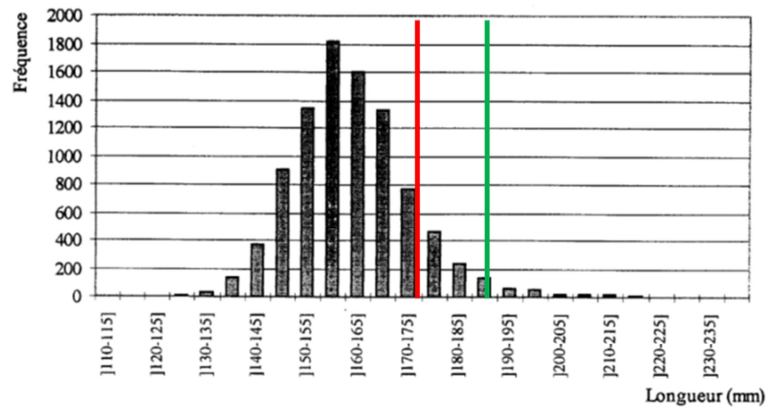
Sur tous les sites, les poissons franchissant par les exutoires et le canal de transfert sont de taille légèrement supérieure à ceux qui n'ont pas été détectés au franchissement et qu'on suppose passés au travers de la grille menant vers les turbines (Tableau 20). Mais cette différence a été statistiquement significative sur deux des quatre sites testés. Il est donc possible que les individus de plus petites tailles passent plus facilement par la grille comme observé dans bien d'autres études (Chanseau, Larinier & Travade, 1999; Travade, Gouyou & De Faveri, 1999; Croze, 2008). D'autre part, il est également possible que les plus petits individus utilisés dans cette étude étaient moins smoltifiés, *i.e.* moins motivés à la dévalaison, et soient restés dans le canal d'aménée, en s'exposant éventuellement à la prédation (comme en témoignent nos observations de plusieurs individus hésitant plusieurs jours en amont de la grille sur les sites d'Auterrive et d'Halsou). En conclusion, ces suivis ne permettent pas de statuer catégoriquement sur le caractère répulsif variable de la grille en fonction de la taille des poissons, dès lors que nous n'avons pas de certitude sur le passage par les turbines des poissons non-détectés.

**Tableau 20** : Taille moyenne des poissons franchissant par l'exutoire et le canal de transfert et des poissons non-détecté au franchissement (et supposés passés par la turbine) sur les quatre sites d'étude. \* Le résultat sur le site d'Halsou est identique avec et sans le lot 1.

Site	Taille moyenne des poissons (mm)			Différence significative
	passés exu	>	non-détectés	
Auterrive	186.1	>	183.3	non
Trois-Villes	186.5	>	183.4	non
Gotein	188	>	180.1	oui
Halsou*	186.2	>	180.8	oui

### 6.4. Extrapolation des résultats aux populations sauvages

Compte tenu de la difficulté de se procurer des smolts sauvages de saumon atlantique en quantité suffisante, les poissons utilisés dans les quatre études provenaient de la pisciculture. Même si Larinier et Travade (1999) ou Nyqvist et al. (2016) n'ont pas observé de différences de comportement migratoire entre les smolts sauvages et de pisciculture, les individus issus des élevages sont en général de plus grande taille que les smolts sauvages. Or, si jamais les grilles à 20 mm d'espacement inter barreaux sont vraiment d'autant moins répulsives que les smolts sont petits, il est légitime de se poser la question du caractère extrapolable de ces résultats aux populations sauvages. Une des études précédentes sur le site d'Halsou sur la Nive (Gosset *et al.*, 1997), piégeant des smolts sauvages en dévalaison, permet d'obtenir une distribution des longueurs à la fourche (moyenne = 165.7 mm ; min – max : 116 - 246 mm, Figure 26).



**Figure 26** : Histogramme des longueurs à la fourche de smolts de saumon atlantique piégés en dévalaison sur la Nive (figure reprise de Gosset et al. 1997).

Selon Dartiguelongue (2008), il est possible de convertir la longueur à la fourche, en longueur totale en appliquant une valeur corrective de +7%. Si l'on considère la valeur de la longueur à la fourche de 175 mm comme la borne haute de la majorité des effectifs sauvages (en rouge sur la Figure 26), cela correspond à une longueur totale de 187.25 mm. En retenant uniquement les poissons de taille inférieure à 187.3 mm dans notre jeu de données, on obtient des efficacités de passage par l'exutoire légèrement plus faibles, mais toujours supérieures à 74 % (entre 74.8 et 87.3 % sur les quatre sites d'étude, Tableau 21). La différence moyenne entre les efficacités basées sur toutes les données et les efficacités calculées sur ce sous-ensemble est de 3.4 % (min – max : 0.3 – 6.1 %). Le même calcul avec un seuil de la longueur à la fourche à 190 mm (en vert sur la Figure 26), et la longueur totale de 203.3 mm, donne les efficacités proches ou supérieures à 80 % (entre 79.6 et 88.1 %, Tableau 21). Et les différences entre les efficacités basées sur toutes les données et en utilisant ce sous-ensemble sont minimales (en moyenne 0.6 %, min – max : -0.6 – 2.0 %).

Il convient toutefois d'analyser ces résultats avec précaution car bien qu'ayant retiré les plus gros individus de notre jeu de données pour le calcul, notre jeu de données présente toujours une sous-représentation des petites tailles. Les individus présentant une longueur à la fourche inférieure à 150 mm, soit une longueur totale inférieure à 160.5 mm sont en quantité non négligeable dans les piégeages de Gosset *et al.* (1997), alors qu'ils sont très minoritaires dans notre jeu de données. Pour autant, ces différents calculs d'efficacité de passage par l'exutoire en fonction de la taille des individus, donnant des valeurs relativement proches, montrent qu'il est raisonnable d'envisager des efficacités satisfaisantes pour les populations sauvages de saumon atlantique.

**Tableau 21** : Différents calculs de l'efficacité de l'exutoire sur les quatre sites d'étude en fonction de la longueur totale (LT) des poissons utilisés.

Site	Pour poissons avec LT < 187,3 mm			Pour poissons avec LT < 203,3 mm			Tout individus testés		
	Nb total de poissons	Nb de poissons passés exu	Efficacité grille/exu (%)	Nb total de poissons	Nb de poissons passés exu	Efficacité grille/exu (%)	Taille (mm)	Nb total de poissons	Efficacité grille/exu (%)
Auterrive	141	110	<b>78,0</b>	230	186	<b>80,9</b>	137 - 225	239	<b>80,7</b>
Trois-Villes	125	109	<b>87,2</b>	201	177	<b>88,1</b>	161 - 221	300	<b>87,5</b>
Gotein	163	122	<b>74,8</b>	284	226	<b>79,6</b>	150 - 220	302	<b>80,9</b>
Halsou (sans lot 1)	198	163	<b>82,3</b>	321	273	<b>85,0</b>	137 - 213	338	<b>87</b>

## 6.5. Temps de passage court par le dispositif de dévalaison

Tel que cela a été vu précédemment, les poissons franchissent plus rapidement l'aménagement par le dispositif de dévalaison s'ils sont déversés la nuit, plutôt que le jour (Tableau 22). Les médianes du temps de passage des poissons sont aussi assez similaires sur trois des quatre sites (Auterrive, Gotein et Halsou), entre 11 et 22min pour les lots déversés la nuit. C'est pour les lots déversés le jour que l'on observe le plus de variabilité en temps de passage. Larinier et Boyer-Bernard (1991) ont suivi l'activité diurne des smolts de saumon atlantique et ont détecté deux fenêtres d'inactivité : le matin entre 9 et 13h et en fin d'après-midi, entre 16 et 18h. A l'opposé, le pic d'activité a été observé entre 22h et minuit, heure de déversement des lots de nuit. Par conséquent, les résultats sur les temps de passage peuvent être influencés par les différents niveaux d'activité des poissons.

Les temps de passage mesurés sur les 4 sites (durée entre le lâcher et la dernière détection dans le dispositif de dévalaison) ne correspondent pas exactement à un retard de migration (durée entre la première présentation d'un poisson à l'usine et son passage à l'aval). Cela est lié au fait que la technologie PIT-Tag employée ne permet pas de détecter l'arrivée des poissons à l'usine. Les temps de passages mesurés sont probablement supérieurs aux éventuels retards de migration mais les valeurs devraient en approcher fortement (à quelques minutes de près) parce que les poissons ont été lâchés très à proximité de l'usine (100 m en amont). Néanmoins, ayant un doute sur les temps de passage des lots diurnes, potentiellement influencés par la moindre activité des poissons, on propose de retenir uniquement les résultats des lots déversés la nuit (Tableau 22). Ainsi, au regard des résultats obtenus, en général 50 % d'individus dévalant franchissent les aménagements étudiés en moins de 22min et 75 % d'individus le font en moins de 2h. Il apparaît donc que la problématique de retard de migration au niveau des différentes prises d'eau testées ne se pose pas avec acuité.

**Tableau 22** : Temps nécessaire pour franchir les quatre sites d'étude par l'exutoire et le canal de transfert.

Site	Temps de passage global		Médiane du temps de passage		Q75 du temps de passage	
	médiane	Q75	jour	nuit	jour	nuit
Auterrive	22min	1h52min	19min <	20-22min	23min <	40-54min
Trois-Villes	1h02	3h16	1h12-4h24 >	25-54min	3h50-7h >	49min-1h42
Gotein	20min	1h08	37-51min >	12-20min	1h25-1h58 >	20-53min
Halsou (sans lot 1)	22min	2h30	1h44-2h57 >	11-22min	3h14 >	23min-1h41

## 6.6. Comparaison avec les études existantes

A ce jour, plusieurs études sur l'efficacité des dispositifs de dévalaison ont été publiées (grille inclinée ou orientée associée à un exutoire, Tableau 23), notamment en France. Mais la comparaison de ces résultats reste tout de même délicate du fait qu'il s'agit de dispositifs différents (différents espacements inter barreaux, différentes inclinaisons ou orientations) et que chaque site a sa propre configuration et courantologie pouvant influencer largement l'efficacité (l'attrait) du dispositif.

Parmi les différentes configurations de plans de grilles inclinés testées, on constate que les grilles à faible espacement entre les barreaux (<20 mm) et l'inclinaison inférieure à 35° atteignent les plus hautes efficacités (toujours supérieurs à 80%) avec de relativement faibles écarts entre les efficacités minimales et maximales observées (Tableau 23). Une seule étude en Suède, sur l'ouvrage Övre Finsjö (Calles, communication), a testé un dispositif semblable à ceux testés dans cette étude et donne finalement une efficacité de passage pour les smolts de truites assez similaire à nos résultats avec 84% d'efficacité. Les autres études disponibles ont été effectuées en général sur des sites de plus grande taille et montrent des résultats assez variables, de 32 à 80 % d'efficacité de passage.

Cependant, ces études évaluent des dispositifs avec de plus grands espacements inter barreaux (supérieurs à 25 mm) et/ou avec une très faible inclinaison (angle  $\beta$  supérieure à 60°, cf. Figure 1), configurations pour lesquelles le caractère répulsif de la grille et le guidage des poissons vers l'exutoire ont été démontrés défavorables (Cuchet, 2014).

Le retour d'expérience sur les grilles orientées (Tableau 23) montre en général de meilleures efficacités de passage : entre 58 et 100 %. Notons cependant que les configurations testées semblent souvent plus favorables pour la protection des poissons (espacement des barreaux entre 15 et 30 mm) et pour leur guidage vers un exutoire (orientation entre 25° et 45°). De l'autre côté, la plupart de ces études ont été menées avec peu d'individus suivis (souvent inférieur à 20) ce qui peut avoir un impact sur la précision et la robustesse de ces résultats. Pour le cas particulier de l'ouvrage de Poutès, il s'agit d'une configuration très différente des autres sites avec une très longue retenue entraînant une quasi absence d'écoulement. Le déficit d'efficacité mesurée sur ce site est certes dû à une efficacité non pleinement satisfaisante de l'exutoire (98 % des poissons entrés en retenue se présentent au moins une fois au barrage) mais surtout combinée à une désorientation des poissons dans la retenue qui effectuent de nombreux allers-retours dans celle-ci et se surexposent ainsi à la prédation (Tétard et al 2016).

### 6.7. Taux de survie à l'échelle des aménagements

Dans le cadre d'étude menée à l'échelle du bassin du Gave d'Oloron et de la Nive en 2002 et 2010 (Anonymous, 2002a b; Voegtli, 2010), la mortalité des smolts au niveau des aménagements a été évaluée sur les 4 sites concernés, en tenant compte :

- des débits en période de dévalaison des smolts, chaque année, sur une période de 10 à 15 années,
- de la répartition des passages des poissons entre ceux entraînés vers l'usine et ceux dévalant par le barrage (fonction du rapport entre le débit d'équipement et le débit caractéristique de la dévalaison des smolts, et de la configuration de l'ouvrage),
- de l'efficacité des dispositifs de dévalaison si déjà présent lors de ces études,
- des mortalités lors du passage par les turbines en fonction de leur caractéristiques (type, diamètre, vitesse de rotation, nombres de pâles ou d'aubes, ...); le passage par les ouvrages évacuateurs au barrage étant considéré sans dommage. Les mortalités de smolts passant par les turbines, calculées pour une taille de 170 mm, varient entre 5.2% à Auterrive et 15% à Halsou (Tableau 24).

Au moment des diagnostics, les taux de survie à l'échelle des aménagements étaient de 99.5% à Auterrive, 93.7% à Trois-Villes, 92.9% à Gotein et 95.7% à Halsou. Suite à l'amélioration des dispositifs de dévalaison selon les critères de Courret et Larinier (2008), ces estimations de survie peuvent être actualisées en tenant compte des efficacités mesurées dans la présente étude. A l'échelle des aménagements, les survies des smolts en dévalaison sont ainsi de quasi 100% à Auterrive, 99.2% à Trois-Villes, et 98.7 à Gotein et 98.2% à Halsou (Tableau 24). Dans l'hypothèse où les 4 centrales étudiées seraient en série sur un axe de migration, la survie des poissons dévalant depuis l'amont serait de 83% avant, et de 96% après améliorations des dispositifs de dévalaison.



**Tableau 23** : Synthèse des études sur l'efficacité des dispositifs de dévalaison : plans de grille de différentes inclinaisons et/ou orientations (en gras : efficacité supérieure à 80%).

référence	site (rivière)	Débit max turbiné (m3/s)	Grille			Exutoire		efficacité de l'exutoire (%)			
			espacement entre les barreaux(mm)	Inclinaison par rapport à l'horizontal	Orientation par rapport au courant d'eau	Nb d'exutoire	débit exutoire (% de débit turbiné)	moyenne	max	min	max-min
<b>Tomanova et al. (2015)</b>	<b>Auterrive (Gave d'Oloron)</b>	<b>9,5</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>5,3</b>	<b>80,7</b>	<b>89,2</b>	<b>75,5</b>	<b>13,7</b>
<b>cette étude</b>	<b>Trois-Villes (Saison)</b>	<b>4,1</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>1</b>	<b>4,9</b>	<b>87,5</b>	<b>97,1</b>	<b>78,8</b>	<b>18,3</b>
<b>cette étude</b>	<b>Gotein (Saison)</b>	<b>6,7</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>5,7</b>	<b>80,9</b>	<b>100</b>	<b>71,2</b>	<b>28,8</b>
<b>Calles (présentation)</b>	<b>Övre Finsjö</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>35</b>	<b>90</b>	<b>2</b>		<b>84</b>	-	-	-
Croze (2008)	Guilhot (Ariège)	27	32	45	90	1	6-8	75	96,1	64	32,1
Croze (2008)	las Rives (Ariège)	39	40	45	90	1	1,9	49	62	37,3	24,7
Croze (2008)	Las Mijeannes (Ariège)	40	30	45	90	1	2,25	32	61,2	14	47,2
<b>Travade et al. (1999)</b>	<b>St Cricq (Gave d'Ossau)</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>55</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>1,5-4,2</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>62,6</b>	<b>37,4</b>
Chanseau et al. (1999)	Bedous (gave d'Aspe)	28	30	>60	90	1	1,6-4,3	55	74,3	38,4	35,9
Travade et al. (1996)	Soeix (Gave d'Aspe)	34,8	35	>60	90	1	2-5,2	59	89	42	47
Croze (2008)	Crampagna (Ariège)	24	30	75	90	1	1,4	65,6	80,4	50	30,4
Chanseau et al. (2002)	Castetarbe (Gave de Pau)	40	25	75	90	3	3-6	33	-	-	-
Croze et al. (1999)	Camon (Garonne)	85	40	79	90	1	2,4-3,6	73	85	57	28
Bosc et al. (2016)	Camon (Garonne)	85	20	79	90	1	3,3	37,1	66	4	62
Bosc et al. (2016)	Pointis (Garonne)	60	20	79	90	2	5	54	76	36	40
Nettles et Gloss (1987)	Wadham (Boquet River)	4,25	25	90	90	1	10,6-24	50	-	-	-
<b>Simmons (2000)</b>	<b>Lower Saranac HEP (Saranac)</b>	<b>31,6</b>	<b>25</b>	<b>90</b>	<b>45</b>	<b>1</b>	<b>2,8-4,3</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>20</b>
Env. Research and Consulting (1996)	Upper Greenwich (Batten Kill)	21,5	25	90	45	1	2,6	64	-	-	-
<b>Nettles et Gloss (1987)</b>	<b>Wadham (Boquet River)</b>	<b>4,25</b>	<b>25</b>	<b>90</b>	<b>36</b>	<b>1</b>	<b>10,6-24</b>	<b>100</b>	-	-	-
<b>HeiB (2015)</b>	<b>Herting HEP (Atran)</b>	<b>40</b>	<b>15</b>	<b>90</b>	<b>30</b>	<b>1</b>	<b>0,75</b>	<b>89,5</b>	-	-	-
<b>Chanseau et al. (2002)</b>	<b>Baigts (Gave de Pau)</b>	<b>90</b>	<b>30</b>	<b>76</b>	<b>30</b>	<b>2</b>	<b>2-13,5</b>	<b>92,5</b>	-	-	-
<b>Larinier et Boyer-Bernard (1991)</b>	<b>Halsou (Nive)</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>64</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>0,9</b>	<b>94,5</b>	<b>100</b>	<b>87,5</b>	<b>12,5</b>
Gosset et al. (1998)	Halsou (Nive)	30	30	64	25	1	1,5-2	56	78	32	46
<b>cette étude</b>	<b>Halsou (Nive)</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>64</b>	<b>15</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>87</b>	<b>94,4</b>	<b>86</b>	<b>8,4</b>
<b>Charles Ritz Ass. (1993)</b>	<b>Hillsborough Mills Dam (Souhegam)</b>	<b>6,8</b>	<b>25</b>	<b>90</b>	<b>~10</b>	<b>1</b>	<b>12,5-16,6</b>	<b>97</b>	-	-	-
Bach et al. (2004) in Tétard et al. (2016)	Poutès (Allier)	28	30	>60	-	1	2,5	58	-	-	-
Tétard et al. (2016)	Poutès (Allier)	28	30	>60	-	1	7,1	66	-	-	-
Ovidio et al. (2017)	Lorcé (Amblève)	26	41	90	0	1	0,7	15,3	22	6	16

Ces taux de survie à l'échelle des aménagements apparaissent satisfaisants. Même si les efficacités atteintes par les dispositifs de dévalaison construits selon les préconisations de Courret et Larinier (2008) n'atteignent pas tout à fait les valeurs espérées au départ (> 90%), elles demeurent élevées (> 80%) et permettent tout de même de réduire significativement les mortalités à l'échelle de chaque aménagement hydroélectrique, sans toutefois les annuler complètement. Avec la mise en œuvre généralisée des prises d'eau ichtyocompatibles (éventuellement adaptée sur les sites existant en cas de fortes contraintes et en fonction de leur niveau d'impact sur les populations de poissons), on peut espérer limiter les impacts cumulés sur la dévalaison des smolts, induits par les aménagements hydroélectriques présents en série sur de multiples cours d'eau à grands salmonidés migrateurs.

**Tableau 24** : Résumé des répartitions des passages des poissons au barrage, taux d'entraînement des poissons dans les turbine (cette étude) et leurs mortalités (selon Anonymous, 2002a b; Voegtli, 2010) et des efficacités de passage globales en tenant compte des passages par le déversoir du barrage, via le dispositif de dévalaison et les survies après le passage par la turbine.

Site	Barrage		Usine		Efficacité total de passage (barrage+usine, %)	
	Proportion (%) de poissons passant par le déversoir du barrage <sup>2</sup>	Proportion (%) des poissons entraînés dans le canal d'aménagé <sup>2</sup>	Proportion (%) des poissons passant par la turbine <sup>3</sup>	Mortalité dans la turbine <sup>2</sup> (%)		Proportion (%) des poissons supposés morts au passage par la turbine
Auterrive <sup>1</sup>	97,6	2,4	0,37	5,2	0,02	99,98
Trois-Villes	8,4	91,6	7,02	11	0,77	99,23
Gotein	32,4	67,6	11,61	11	1,28	98,72
Halsou	9,6	90,4	11,75	15	1,76	98,24

<sup>1</sup> site sans barrage en rivière

<sup>2</sup> selon Anonymous, 2002a, 2002b; Voegtli, 2010

<sup>3</sup> calculé utilisant les résultats de cette étude (= proportions des individus non-détectés, supposés de passer par la grille et turbine)

## 6.8. Perspectives

A présent, il est nécessaire de poursuivre l'acquisition de retours d'expérience sur les efficacités des prises d'eau ichtyocompatibles pour les smolts au niveau de prises d'eau de plus grande taille, ainsi que sur les anguilles argentées.

C'est pourquoi en 2017, en collaboration entre le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF, le bureau d'études Ecogea et le Pôle Ecohydraulique de l'AFB, un suivi a été lancé sur ces deux espèces au niveau 4 centrales présentes en série sur l'Ariège (Las Rives, Las Mijeannes, Guilhot et Pébernat) dont les débits maximum turbinés vont de 32 à 50 m<sup>3</sup>/s.

Parallèlement, il serait intéressant d'acquérir également un retour d'expérience sur l'exploitation des prises d'eau ichtyocompatibles (pertes de charge, fréquence de sollicitation du dégrilleur, ...).

## 7. Références

### Références dans le texte

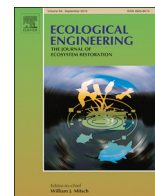
- Anonymous (2002a) Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique – Proposition d'aménagement – Le Gave D'Oloron. Dossier S.I.E.E. – GHAAPPE n° TE010803.
- Anonymous (2002b) Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique – Proposition d'aménagement – Le Saison. Dossier S.I.E.E. – GHAAPPE n° TE010803.
- Bosc S., Nars A., Menchi O. & Robert E. (2013) Contrôle de la migration des smolts de saumon atlantique en dévalaison au niveau des dispositifs de piègeage et de transport de Camon et de Pointis sur la Garonne. MIGADO.
- Brett J.R. & Alderdice D.F. (1958) Research on guiding young salmon at two British Columbia field stations. Fisheries research Board of Canada, Biological Station, Nanaimo, Bulletin 117.
- Chanseau M., Larinier M. & Travade F. (1999) Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radiotéléométrie. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 99–120.
- Courret D. & Larinier M. (2008) Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport GHAAPPE RA.08.04. 60p + annexe.
- Croze O. (2008) Assessment of downstream fish bypasses for Atlantic salmon smolts at four hydroelectric facilities on the Ariège River (France). In: American Fisheries Society Symposium. pp. 123–140.
- Cuchet M. (2014) Fish protection and downstream migration at hydropower intakes. Investigation of fish behavior under laboratory conditions. Technischen Universität München.
- Dartiguelongue J. (2008) Synthèse des études menées au Ramier depuis 1990. Contrôle de la migration de dévalaison des juvéniles de salmonidés au printemps et contrôle de la migration de montaison. MIGADO.
- Gomes P. & Larinier M. (2008) Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan. Etablissement de formules prédictives. ONEMA Rapport GHAAPPE RA08.05.
- Gosset C., Travade F., Voisin M. & Garaicoechea C. (1997) Etude de dispositifs de dévalaison pour smolts de saumon atlantique. Centrale hydroélectrique de Halsou (Nive - 64-). Rapport de contrat INRA/EDF.
- Larinier M. & Boyer-Bernard S. (1991) Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture **321**, 72–92.
- Larinier M. & Travade F. (1999) La dévalaison des migrateurs : problèmes et dispositifs. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture **353–354**, 181–210.
- Larinier M. & Travade F. (1999) The development and evaluation of downstream bypasses for juveniles salmonids at small hydroelectric plants in France. In: Odeh M (Ed). Innovations in fish passage technology, American Fisheries Society. Bethesda, Maryland, 25-42.
- Nyqvist D., Greenberg L.A., Goerig E., Calles O., Bergman E., Ardren W.R., et al. (2016) Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. Ecology of Freshwater Fish **26**, 707–718.
- Raynal S., Chatellier L., David L., Courret D. & Larinier M. (2013) Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Etude de l'alimentation en débit et du positionnement des exutoires de dévalaison au niveau de plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles. Rapport Pole RA12.02.

- Raynal S., Chatellier L., David L., Courret D. & Larinier M. (2012) Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Pertes de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles et champs de vitesse à leur approche. Rapport Pole RA11.02.
- Tomanova S., Alric A. & Courret D. (2015) Test d'efficacité des exutoires de dévalaison pour les smolts de saumon atlantique: Centrale hydroélectrique d'Auterrive sur le Gave d'Oloron (64). Rapport ONEMA.
- Travade F., Gouyou C. & De Faveri N. (1999) Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) à l'aménagement hydroélectrique de St. Cricq sur le gave d'Ossau. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 157–180.
- Travade F. & Larinier M. (1992) La migration de dévalaison : problèmes et dispositifs. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 165–176.
- Voegtlé B. (2010) Simulations des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique. Rapport ECOGEA E080501.01.

### Références du Tableau 23

- Bach, J.-M., Caut, I., Lelièvre, M. & Viillard, J. (2004) Suivi de la dévalaison 2004 des saumoneaux au droit du barrage de Poutès. Saint Pourçain sur Sioule, Rapport LOGRAMI.
- Bosc, S., A. Nars, & O. Menchi (2016) Contrôle de la migration des smolts de saumon atlantique en dévalaison au niveau des dispositifs de piégeage et de transport de Camon et de Pointis sur la Garonne. Campagne 2015. Rapport MIGADO. : 61.
- Calles, O., (n.d.). What goes up must come down: New techniques to improve downstream fish passage. <http://docplayer.net/11296169-What-goes-up-must-come-down-new-techniques-to-improve-downstream-fish-passage-olle-calles.html>.
- Chanseau, M., O. Barriere, & F. Travade (2002) Etude de la migration des juvénils de saumon atlantique (*Salmo salar*) au niveau des aménagements hydroélectriques de Castetarbe Baigts-de-Béarn et Puyoo sur le Gave de Pau en 2001. Rapport EDF MIDIVAL. : 34.
- Chanseau, M., M. Larinier, & F. Travade (1999) Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radiotéléométrie. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 99–120.
- Charles Ritzi Associates (1993) Report of Results of a Study of the Effectiveness of Downstream Fish Passage Facilities at the Pine Valley Hydroelectric Project (FERC No. 9282) Souhegan River, New Hampshire. : 70.
- Croze, O., 2008. Assessment of downstream fish bypasses for Atlantic salmon smolts at four hydroelectric facilities on the Ariege River (France). American Fisheries Society Symposium. : 123–140, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.577.8349&rep=rep1&type=pdf>.
- Croze, O., M. Chanseau, & M. Larinier (1999) Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 121–140.
- Environmental Research and Consulting, Inc. (1996) Evaluation of the fish passage effectiveness of angled trash racks and bypasses at the Upper and Middle Greenwich water power projects. : 10.
- Gosset, C., F. Travade, C. Labastie, & C. Garaicoechea (1998). Etude de dispositifs de dévalaison pour smolts de saumon atlantique: influence de la lumière sur l'efficacité des exutoires de

- dévalaison. Centrale hydroélectrique de Halsou (Nive - 64-). Rapport de contrat INRA/EDF. : 34.
- Gosset, C., F. Travade, M. Voisin, & C. Garaicoechea (1997) Etude de dispositifs de dévalaison pour smolts de saumon atlantique. Centrale hydroélectrique de Halsou (Nive - 64-). Rapport de contrat INRA/EDF. : 85.
- Heiß, M. (2015) Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. Ludwig - Maximilians - Universität München: 61.
- Larinier, M., & S. Boyer-Bernard (1991) Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 72–92.
- Nettles, D. C., & S. P. Gloss (1987) Migration of Landlocked Atlantic Salmon Smolts and Effectiveness of a Fish Bypass Structure at a Small-Scale Hydroelectric Facility. North American Journal of Fisheries Management 7: 562–568.
- Ovidio, M., A. Dierckx, S. Bunel, L. Grandry, C. Spronck, & J. P. Benitez (2017) Poor Performance of a Retrofitted Downstream Bypass Revealed by the Analysis of Approaching Behaviour in Combination with a Trapping System. River Research and Applications 33: 27–36.
- Simmons, R. A., (n.d.). Effectiveness of a fish bypass with an angled bar rack at passing atlantic salmon and steel head trout smolts at the lower Saranac hydroelectric project Advances in fish passage technology: engineering design and biological evaluation. Oden M.: 95–102.
- Tétard, S., M. Lemaire, P. Martin, & E. De Oliveira (2016). Comportement des smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) au voisinage du barrage de Poutès (Allier, France). Bilan des études de télémétrie acoustique réalisées en 2014 et 2015. Rapport EDF. EDF: 60.
- Tomanova, S., A. Alric, & D. Courret (2015) Test d'efficacité des exutoires de dévalaison pour les smolts de saumon atlantique: Centrale hydroélectrique d'Auterrive sur le Gave d'Oloron (64). Rapport ONEMA. : 26.
- Travade, F., C. Gouyou, & N. De Faveri (1999). Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) à l'aménagement hydroélectrique de St. Cricq sur le gave d'Ossau. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 157–180.
- Travade, F., M. Larinier, D. Ingendahl, J.-M. Bach, D. Pujo, & D. Barracou (1996) Expérimentation d'un dispositif de dévalaison pour les juvéniles de saumon atlantique (année 1994) : usine hydroélectrique de Soeix (Gave d'Aspe - 64). Rapport GHAAPPE 96.02. : 168.



## Protecting efficiently sea-migrating salmon smolts from entering hydropower plant turbines with inclined or oriented low bar spacing racks



Sylvie Tomanova<sup>a,\*</sup>, Dominique Courret<sup>a,\*</sup>, Alain Alric<sup>a</sup>, Eric De Oliveira<sup>b</sup>, Thierry Lagarrigue<sup>c</sup>, Stéphane Tétard<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Agence française pour la biodiversité – Pôle Ecohydraulique, AFB-IMFT-Université de Toulouse-CNRS, 2 allée Prof Camille Soula, Toulouse 31400, France

<sup>b</sup> EDF R&D, LNHE, 6 quai Watier, 78 401 Chatou, France

<sup>c</sup> ECOGEA, 352 avenue Roger Tissandier, 31 600 Muret, France

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

River connectivity  
Hydropower  
Fish protection  
Downstream passage solution

### ABSTRACT

Restoring the longitudinal connectivity of rivers is becoming a conservation priority in countries with high hydroelectric plant (HEP) development. Newly designed downstream passage solutions for fish are being installed in small and medium-sized HEPs in France, and an accurate evaluation of their functionality is needed. Here we addressed the efficiency of protection systems for the downstream migration of Atlantic salmon smolts at four HEPs (three 26° horizontally inclined racks and one 15° oriented to the flow rack in the bank alignment, all with 20 mm spaced bars). Between 239 and 300 hatchery-reared salmon smolts were PIT-tagged and released in 5–6 groups 100 m upstream of each studied HEP. Their passages through the HEPs were detected with radio frequency identification (RFID) antenna in the bypasses for downstream migration and the fish passes for upstream migration. On average between 82.8% and 92.3% of released smolts successfully passed the HEP through one of the two non-turbine routes. Resulting mean bypass passage efficiency ranged from 80.9 to 87.5% and all fish groups reached over 70% passage efficiency. Excepting one site, 50% of smolts passed through the bypass in less than 23 min after release, and 75% of them in less than 2 h 15 min. Combining our findings with previously estimated fish entrainment rates into the intake channel and turbine-related mortality rates, we assessed the overall fish survivals at the studied dam/HEPs which are between 98.24% and near 100%. Our results confirm recommended design criteria for inclined and oriented racks and the interest of the tested devices for the protection of downstream migrating salmon smolts.

### 1. Introduction

Despite the impacts related to river fragmentation, hydropeaking or impoundment, the energy production by hydropower is promoted by the European Directive 2009/28/CE (2009), which encourages the use of renewable energy. However, the multiplication of hydroelectric power plants (HEP) along fish migration routes may lead to important cumulative impacts on several endangered migratory species (Marohn et al., 2014; Verbiest et al., 2012). This is the case for the Atlantic salmon (*Salmo salar*) for instance, a declining migratory species in the North Atlantic river basins (Limburg and Waldman, 2009). Contrarily to upstream movements addressed by the development of a wide variety of fish passes, downstream migration issues have been recognized only recently (Larinier and Travade, 2002), calling for further development to prevent the important fish mortality (immediate or delayed) caused by turbine entrainment (Larinier and Dartiguelongue, 1989; Montén, 1985).

A functional downstream fish passage solution must ensure safe and

fast passage route for a substantial portion of migrating fish (Nyqvist et al., 2016). Two different kinds of fish protection systems have been tested with varying success: physical (screens) barriers associated with bypass and behavioral (electricity, sound, bubbles...) barriers (see Larinier and Travade, 2002; OTA, 1995 for review). Physical barriers seem however more efficient than the behavioral ones. Several conventional trashracks with modified bar spacing (between 20 and 40 mm) and combined with downstream bypass were evaluated for fish protection (Chanseau et al., 1997; Croze, 2008; Larinier and Travade, 1999; Ovidio et al., 2017), but usually gave low satisfaction due to low (slightly more than 10% in Ovidio et al., 2017 for example) and/or very variable passage efficiency (ranging from 14 to 61% for example at Las Mijeannes study site in France, see Table 5). These studies usually concluded that the passage efficiency is highly dependent on the repulsive effect of the rack (depending on bar spacing) and on the velocity pattern in front of the rack guiding the fish to the bypass entrance. These features were among the main concerns in the following

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [sylvie.tomanova@afbiodiversite.fr](mailto:sylvie.tomanova@afbiodiversite.fr) (S. Tomanova), [dominique.courret@afbiodiversite.fr](mailto:dominique.courret@afbiodiversite.fr) (D. Courret).



developments of fish protection systems. In 2008, Courret and Larinier (2008) proposed two types of fish protection facilities for small and medium sized HEP: (i) horizontally inclined and (ii) oriented to the flow racks, both with narrowly spaced bars, associated to a downstream bypass. Both systems were designed in order to maximize the protection of fish from entering the turbines and to guide them through the safe way (bypass). These authors recommended the following criteria for these protection racks: (1) low bar spacing ( $\leq 25$  mm for salmon and sea trout smolts protection,  $\leq 15$ – $20$  mm for silver eels), (2) a normal velocity (i.e. the velocity near the front of the rack, preventing fish impingement)  $\leq 0.5$  m·s<sup>-1</sup>, (3) an inclination angle relative to the horizontal  $\leq 26^\circ$  for inclined racks, to guide fish to the top of the rack towards bypass entrance(s); or an orientation of racks to the flow direction  $\leq 45^\circ$ ; and (4) several other criteria for the bypass entrance design, including dimensions, position, spacing and entrance velocity allowing to define the targeted discharge in the bypass, ideally between 2 and 5% of HEP turbine discharge (see Courret et al., 2015; Courret and Larinier, 2008 for more details). Hydraulic studies on both rack types (i.e. inclined and oriented) confirmed satisfactory conditions for energy production (acceptable head-loss), good flow directions in front of the rack for fish guidance towards the bypass entrances, and no risk for fish impingement against the rack (Raynal et al., 2012, 2015). However, the *in situ* efficiency of these devices to protect downstream migrating fish remains to be tested.

Since 2010, several rack protection systems have been implemented in France following the recommendations from Courret and Larinier (2008) detailed above and making possible *in situ* efficiency studies on downstream migrating fish. Here we present the first efficiency test of these protection systems, supposed to improve the downstream movement protection for Atlantic salmon smolts. We used a radio frequency identification technique (RFID) to study the downstream migration of PIT-tagged hatchery-reared smolts, released at four different run-of-river HEPs during their migration period (in April 2015 and 2016). If these recently implemented rack protection systems actually improve the conditions for downstream migration, we should observe high fish passage efficiencies (ratio of all fish passing by the protection system to the total number of fish passing through the HEP), greater than for older systems (Table 5), and short migration time (duration of fish passage). Furthermore, to recognize these protection devices as functional passage solutions, high efficiency levels should be found under different HEP configurations. And finally, an efficient downstream passage solution should significantly increase the overall survival of fish crossing the dam/HEP installations. If the rack configurations proposed by Courret and Larinier (2008) accomplish these requirements and improve the conditions for fish migration, the equipment of other small and medium-sized HEPs should greatly benefit downstream migrating endangered fish species.

## 2. Material and methods

### 2.1. Study sites

The study was conducted at four small and medium-sized run-of-river HEPs in southwestern France. The description of studied racks is summarized in Table 6. The bar thickness and bar spacing were 8 and 20 mm respectively for all studied fish protection racks. All racks were equipped with mechanical debris cleaners.

The Auterrive HEP (43°28'07"N, 0°59'55"W, CAM Energy society), located downstream from an intake channel of 400 m diverted from the Gave d'Oloron River, has a maximum intake capacity of 9.5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (7.8 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> during the study). This HEP is equipped with a 'pool and weir' fish pass for upstream migration (0.5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) and an inclined rack in front of the turbine with a bypass for downstream migration (Fig. 1, Table 6). The rack is inclined at 26° to the horizontal and has two bypass entrances on the top: one on the right side (0.5 m of width) and the other in the middle (0.7 m) of the rack, both fed with a total discharge

of 0.5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> regulated by a flap gate (6.4% of the turbine discharge during the study). The water level upstream of the HEP is not regulated because there is no dam in the river. Therefore, the water depth in the bypass entrances varies between 0.5 and 1.2 m, and the flow velocity between 0.35 and 0.83 m·s<sup>-1</sup>.

The Trois-Villes HEP (43°07'33"N, 0°52'49"W, Société hydroélectrique de Gotein) is situated 550 m from the Saison River and has a maximum intake capacity of 4.1 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (3.9 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> during the study). This site is equipped with a Denil fish pass (0.15 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) and an eel pass for upstream migration and an inclined rack in front of the turbine with a bypass for downstream migration (Fig. 1, Table 6). The rack, inclined at 26° to the horizontal, has one bypass entrance (1 m width) on the top left corner of the rack, fed with a discharge of 0.2 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> controlled by a broad-crested weir (5.1% of the turbine discharge during the study). The water depth in the bypass entrance is 0.5 m and the flow velocity 0.4 m·s<sup>-1</sup>. The discharge in the intake channel is regulated by a dam in the river and the intake channel section. A motorized bottom gate is installed near the turbine intake on the right bank (Fig. 1), operating when the discharge in the intake channel exceeds the total HEP capacity. In such cases, the motorized bottom gate opens and the exceeding water is evacuated through a canal directly to the tailrace. During the study, this control gate was regularly in function.

The Gotein HEP (43°10'47"N, 0°54'08"W, Société hydroélectrique de Gotein), 7 km downstream from the Trois-Villes HEP, is located downstream of an intake channel of 780 m diverted from the Saison River. The turbine discharge during the study was the maximum HEP intake capacity: 6.7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. This site is also equipped with a Denil fish pass (0.15 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) and an eel pass for upstream migration, and with an inclined rack in front of the turbine with a bypass for downstream migration (Fig. 1, Table 6). The rack, inclined at 26° to the horizontal, has two bypass entrances on the top: one on the right side and another one in the middle (each one of 0.8 m width), both fed with a total discharge of 0.38 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> controlled by a broad-crested weir (5.7% of intake HEP capacity). The water depth in the entrances is 0.5 m and the flow velocity 0.47 m·s<sup>-1</sup>. The intake discharge is regulated at the beginning of the intake channel by a dam and a control gate, but in case of discharge excess, the water is evacuated through a spillway situated on the left bank of the intake channel. There was no spillage during the study.

The Halsou HEP (43°22'28"N, 1°25'38"W, Electricité de France EDF), with a maximum intake capacity of 30 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (23.8 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> maximum during the study), is located 925 m downstream of an intake channel diverted from the Nive River. This HEP is equipped with a 'pool and weir' fish pass (0.7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) for upstream migration and an oriented rack in front of the turbines, inclined at 64° to the horizontal and oriented at 15° to the flow. A surface bypass entrance (1.38 m width) is located at the right downstream end of the rack (Fig. 1, Table 6), between the rack and the spillway evacuating the water excess when the turbines shut down. Bypass discharge is regulated by a flap gate to 5% of the turbine discharge. This discharge fluctuates therefore between 1.0 and 1.5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> depending on the HEP turbine discharge, ranging from 20 to 30 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. The minimum depth in the bypass entrance is 0.5 m and the flow velocity varies between 0.7 and 1.4 m·s<sup>-1</sup>, depending on the discharge and the forebay water level. The Halsou HEP is equipped with a low-power mercury vapor lamp located 1.5 m above the bypass entrance to attract the fish. Fish passing through the bypass entrance fall into a reception pool of 1.20 m deep which connects to the spillway canal (Fig. 1). During the study, spillage only occurred a few times. Contrarily to the three previous sites (where wastes on the rack are evacuated through the fish bypass), the mechanical cleaner of Halsou HEP uses a separate canal for the evacuation of vegetal debris.

### 2.2. Fish tagging and release

To test the efficiency of the protection systems in our four studied HEPs, we used hatchery-reared Atlantic salmon smolts (Castels hatchery of MI.GA.DO association). At Auterrive HEP, the fishes were

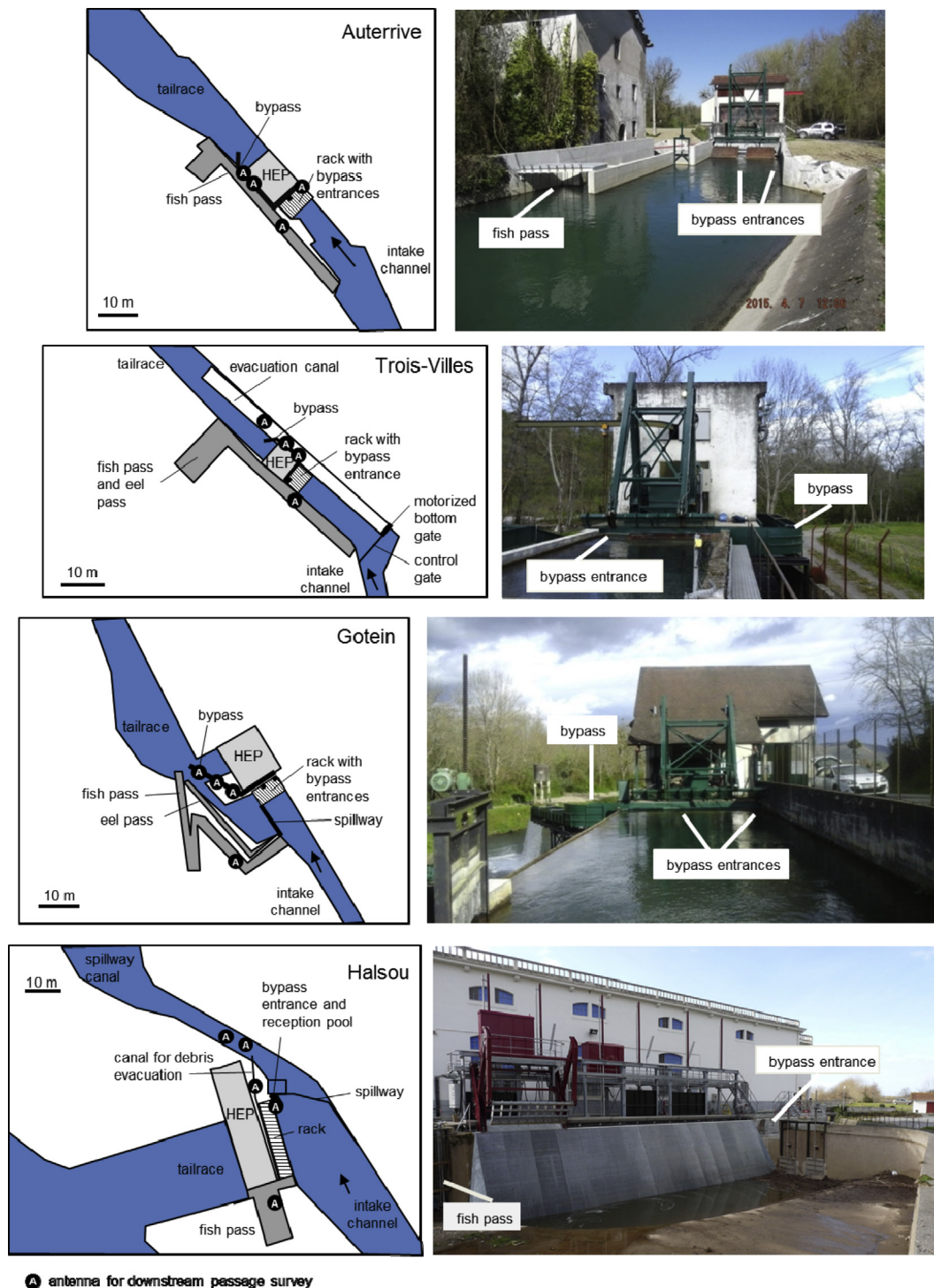


Fig. 1. Schema and photos of the study sites: Auterrive, Trois-Villes and Gotein HEP with inclined racks and Halsou HEP with oriented rack.

tagged in the field several hours before their release. For the three other sites, the fishes were tagged at the fish farm two weeks before their release. The same tagging procedure was always applied. The anaesthetized fish (3–5 min in a bath with clove oil) were first measured (total length) and then tagged with a PIT-tag (23 mm) inserted into the body cavity. The surgical procedure lasted a few seconds. After tagging, the fish were kept in a pool with water, where they recovered and could swim normally after a few minutes. Two weeks after the tagging at the fish farm, no fish had rejected its tag.

The study was conducted during the migration period of wild salmon smolts (in April 2015 and 2016) and typical functioning of HEPs

during this period (turbine discharge approaching maximum intake capacity). The fish were transported to each site the day before the release and were kept in circular tanks supplied with water from the intake channel. At each site, tagged fish were released in 5 or 6 groups of 37–72 individuals (usually 50) into the intake channel, 100 m upstream of the studied HEP at different times of the day (Table 1). The total length of the tagged fish ranged from 137 to 225 mm, with a mean length of approximately 186 mm at each site. No significant difference in fish length was detected between the released groups (ANOVA test, p-value > 0.05). The environmental conditions (temperature and discharge), during and several days after the release of all smolt groups,

**Table 1**  
Released fish groups and proportion of individuals detected (or not) in different ways at the study sites (in bold: total or mean values for each site).

Site/Group	Number of ind.	Time of release	Fish length (mm)			Proportion of released individuals (%)				Overall passage minimum efficiency
			Min	–	Max	undetected	detected in			
							bypass	fish pass	evac. canal	
<i>Auterrive</i>										
A_1	37	20:20	160	–	205	8.1	89.2	2.7		91.9
A_2	59	14:48	137	–	210	11.9	84.7	3.4		88.1
A_3	47	21:21	156	–	225	17.0	76.6	6.4		83.0
A_4	49	23:28	166	–	212	24.5	75.5	0		75.5
A_5	47	10:25	158	–	211	14.9	78.7	6.4		85.1
<b>all groups</b>	<b>239</b>		<b>137</b>	–	<b>225</b>	<b>15.5</b>	<b>80.9</b>	<b>3.8</b>		<b>84.7</b>
<i>Trois-Villes</i>										
TV_1	50	18:28	166	–	205	8	74 (88.1)	2	16	92
TV_2	50	22:20	162	–	210	12	48 (80)	0	40	88
TV_3	50	00:12	165	–	205	6	50 (86.2)	2	42	94
TV_4	50	18:07	161	–	211	4	76 (95)	0	20	96
TV_5	50	22:07	165	–	221	2	66 (97.1)	0	32	98
TV_6	50	23:34	159	–	204	14	52 (78.8)	0	34	86
<b>all groups</b>	<b>300</b>		<b>159</b>	–	<b>221</b>	<b>7.7</b>	<b>61 (87.5)</b>	<b>0.67</b>	<b>30.7</b>	<b>92.3</b>
<i>(in brackets proportions computed when the fish passing through the evacuation canal are ommitted)</i>										
<i>Gotein</i>										
GOT_1	50	19:45	171	–	202	0	100	0		100
GOT_2	50	22:40	158	–	212	22	76	2		78
GOT_3	50	00:40	155	–	211	20	78	2		80
GOT_4	50	18:37	152	–	209	10	88	2		90
GOT_5	50	22:38	150	–	213	28	72	0		72
GOT_6	52	00:17	165	–	220	23.1	71.2	5.8		76.9
<b>all groups</b>	<b>302</b>		<b>150</b>	–	<b>220</b>	<b>17.2</b>	<b>80.9</b>	<b>2.0</b>		<b>82.8</b>
<i>Halsou</i>										
HAL_1	50	21:13	137	–	210	14	86	0	0	86
HAL_2	50	22:47	167	–	205	14	86	0	0	86
HAL_3	50	18:15	144	–	213	10	90	0	0	90
HAL_4	66	21:42	157	–	212	13.6	78.8	0	7.6	78.8
HAL_5	72	23:05	166	–	210	5.6	94.4	0	0	94.4
<b>all groups</b>	<b>288</b>		<b>137</b>	–	<b>213</b>	<b>11.4</b>	<b>87.0</b>	<b>0,0</b>	<b>1.5</b>	<b>87.0</b>

remained stable at all sites, assuming constant bypass hydraulic attractiveness (bypass discharge representing at least 5% of turbine discharge).

### 2.3. Detection of downstream migration

Downstream movements of tagged fish were detected with several antennas covering all possible migration routes (Fig. 1), except through the turbines and upstream in the intake channel (technically impossible with the RFID technology). At each site, one antenna was placed in the fish pass, and an array of two or three antennas in the bypass (in the spillway canal at Halsou site). The use of two (or three) consecutive antennas allowed a better detection of fish passages through the bypass under high flow velocity conditions. Preliminary tests in Trois-Villes, Gotein and Halsou sites, with tagged fish released directly into the bypass, showed a detection efficiency of nearly 100%. In Trois-Villes HEP, a supplementary antenna was placed in the evacuation canal. In Halsou, the canal for debris evacuation was also equipped with an antenna because previous observations showed some individuals retained by the rack cleaner. In Auterrive and Halsou sites, an antenna was installed in the bypass entrance for complementary detection of fish approaches near the bypass entrance. The detection ranges varied from 40 to 100 cm upstream and downstream of each antenna. Each antenna was connected to the BASIC or DAMONA decoder (CIPAM society), which automatically stored the information on date, time and ID of tagged fish within the detection range of the antennas. Each decoder can store the data from two antennas which operate simultaneously.

### 2.4. Data analysis

The fish guidance efficiency, that is the percentage of fish successfully guided to the entrance of a particular passageway, is commonly used to evaluate fish protection systems (Bunt et al., 2012; Noonan et al., 2012). Because inclined metal racks could disrupt the efficiency of the RFID technology, the evaluation of this metric could be biased. Indeed, the detection efficiencies from antennas constructed at the bypass entrance in two sites were not satisfactory, preventing the estimation of guidance efficiency at the entrance of the passageway. For this reason, only the data from the antenna arrays installed in the bypass sections (spillway canal at Halsou site) and in the fish passes were used to compute the percentage of successful fish passages through the HEPs.

Two possibilities are left for individuals not detected by the antennas: to cross the rack and enter into the turbines or to swim upstream in the intake channel (and be possibly predated). For an accurate estimation of the fish passage efficiency, we should ideally adjust the number of tested fish by removing upstream migrating individuals. Unfortunately the used RFID technology did not allow detecting them. Following Ovidio et al. (2017), we hypothesized that all undetected fish passed through the turbines, resulting in a minimum passage efficiency estimate. We assume, however, that our minimum passage efficiency estimates are very close to the real passage efficiency because of the predictable behavior of salmon smolts for downstream migration.

Based on this assumption, we computed the proportion of successfully migrating fishes through different possible passage ways: bypass, fish pass and evacuation canal. We present four principal results: i) the bypass passage minimum efficiency, ii) the overall passage minimum efficiency (passages through the bypass + fish pass + evacuation

canal), iii) the difference (tested with Student *t*-test) in body length between fishes detected in the bypass and those undetected (i.e. those assumed to cross the rack, giving an indication of the rack selectivity), and iv) the migration time needed to safely pass through the HEP by the bypass (computed as the time between the fish release in the intake channel and its last detection in the bypass or spillway canal).

To estimate the overall fish passage survival through dam/HEP installations with and without tested protection systems, we followed the schematic diagram from Baudoin et al. (2015), and accounted for i) the rate of fish passing directly through the dam (considered as safe way), ii) the rate of fish entrainment from the river into the intake channels and the HEP, iii) the proportion of them passing through a safe way at the HEP level (through the bypass, fish pass or evacuation canal) and iv) the proportion of fish passing through the turbine and their mortality rate. The first two parameters can be estimated knowing the dam configuration and the discharge partitioning between the dam and the intake channel. These two rates were computed for each of our studied sites by Anonymous (2002a) and Voegtlé (2010) with more than 10 years of discharge data recorded during the migration period of salmon smolts. The third parameter was determined in our study, and the fourth parameter was computed using mortality rate related to turbines of our sites published in previous studies (Anonymous, 2002a,b; Voegtlé, 2010). Then the overall fish survival for each site was computed by summing fish proportions passing over the dam and those safely crossing the HEP.

### 3. Results

At Auterrive site, on average 80.9% (from 75.5 to 89.2% depending on the group) of smolts migrated through the bypass, and 3.8% (0–6.4%) passed through the fish pass (Table 1), resulting in a total of 84.7% (75.5–91.9%) of released smolts that successfully crossed this HEP using these two migration passes. At Trois-Villes site, on average 92.3% of fish (ranging from 88 to 98%) crossed the HEP through a safe way. Important proportions of individuals (from 16 to 42%) were sucked into the evacuation canal when control gate regulating exceeding water opened. These proportions were always higher for groups released during the night. Consequently, the proportions of fish swimming through the bypass (between 48 and 74%, 61% on average) were smaller compared with the other sites. Nevertheless, when computing the bypass passage efficiency excluding the individuals passing through the control gate, we obtain comparable values ranging from 80 to 97.1%, with an average bypass passage minimum efficiency of 87.5%. At Gotein site, the bypass passage minimum efficiency ranged from 71.2 to 100% (80.9% on average). Curiously, the groups released in the evening achieved higher passage efficiencies (13–22% greater). Including passages in the fish pass, the overall passage minimum efficiency at this site was 82.8% on average (from 72 to 100%). Finally, at Halsou site we obtained similar results to the other sites. Bypass passage minimum efficiency was 87% on average and ranged from 86% to 94.4% for the released groups. 5 individuals were detected in the debris

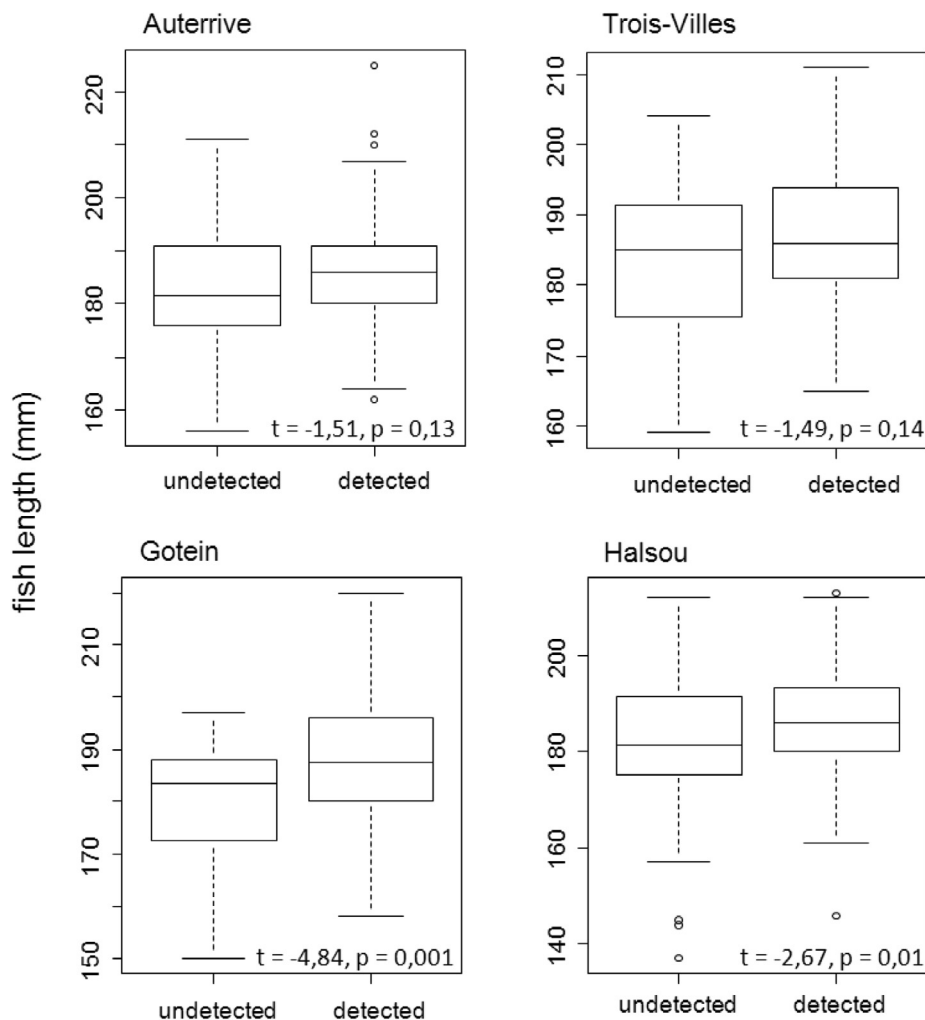


Fig. 2. Comparison of the length between undetected fishes (presumably passed through the rack) and fishes detected in the bypass (tested with Student *t*-test).



**Table 2**  
Fish migration times through the bypass.

Site/Group	Min.	1Quartile	Median	3Quartile	Max.
<i>Auterrive</i>					
A_1	0:11:03	0:14:59	0:18:47	0:23:12	0:58:55
A_2	0:07:47	0:13:53	0:18:29	0:31:51	46:13:00
A_3	0:12:49	0:15:05	0:20:04	0:39:47	5:46:54
A_4	0:11:50	0:15:33	0:21:36	0:54:26	47:00:00
A_5	0:12:43	2:28:12	3:17:00	6:37:06	54:18:34
<b>all groups</b>	<b>0:07:47</b>	<b>0:15:33</b>	<b>0:22:24</b>	<b>1:51:50</b>	<b>54:18:34</b>
<i>Trois-Villes</i>					
TV_1	1:08:10	3:21:13	4:24:06	7:00:07	9:45:10
TV_2	0:12:11	0:21:43	0:54:07	1:42:09	4:06:33
TV_3	0:07:12	0:11:23	0:28:17	1:21:26	5:00:13
TV_4	0:06:41	0:46:15	1:11:41	3:49:30	40:58:52
TV_5	0:04:25	0:17:55	0:24:41	0:49:04	3:08:22
TV_6	0:08:55	0:18:03	0:37:32	1:06:16	16:35:00
<b>all groups</b>	<b>0:04:25</b>	<b>0:24:41</b>	<b>1:02:01</b>	<b>3:15:39</b>	<b>40:58:52</b>
<i>Gotein</i>					
GOT_1	0:06:35	0:14:48	0:51:29	1:57:16	187:33:21
GOT_2	0:08:17	0:13:51	0:20:32	0:41:12	6:05:32
GOT_3	0:03:25	0:07:02	0:11:53	0:19:57	1:31:24
GOT_4	0:05:31	0:18:17	0:37:19	1:25:03	44:48:44
GOT_5	0:03:47	0:10:56	0:19:45	0:53:25	52:22:36
GOT_6	0:05:55	0:13:00	0:18:27	0:35:38	108:06:54
<b>all groups</b>	<b>0:03:25</b>	<b>0:12:05</b>	<b>0:19:59</b>	<b>1:08:13</b>	<b>187:33:21</b>
<i>Halsou</i>					
HAL_1	0:01:09	0:04:09	0:11:15	0:25:45	4:54:00
HAL_2	0:01:06	0:02:30	0:21:12	1:41:06	22:30:00
HAL_3	0:50:12	2:18:12	2:57:06	3:14:00	82j 12:30:56
HAL_4	0:01:06	0:02:54	0:10:30	0:23:20	33j 23:23:35
HAL_5	0:01:20	0:05:06	0:14:06	0:46:20	6j 23:26:53
<b>all groups</b>	<b>0:01:06</b>	<b>0:04:37</b>	<b>0:17:35</b>	<b>2:14:37</b>	<b>82j 12:30:56</b>

evacuation canal but were omitted from the efficiency evaluations (debris canal was not considered as a safe way for fish although our observations confirmed an apparent integrity of fishes), and no passage was detected in the fish pass.

At all four sites, the mean length of undetected fish was always smaller than the mean length of fish detected in the bypass section: 183.3 < 186.1 mm at Auterrive site; 183.4 < 186.5 mm at Trois-Villes site; 180.1 < 188 mm at Gotein site and 180.8 < 186.2 mm at Halsou site (Fig. 2). However, this difference was statistically significant only in two cases: at Gotein ( $t = -4.84, p = 0.001$ ) and at Halsou site ( $t = -2.67, p = 0.01$ ).

At Auterrive and Halsou sites (equipped with an antenna in the bypass entrance), first individuals approaching the bypass entrances were detected in a few minutes after their release. However, many of these detections were repeated, spaced by several seconds, minutes or hours, revealing hesitations of some individuals. First migrations through the bypass were detected in less than 13 min after the fish release for nearly all groups and all sites

**Table 3**

Overall fish survival estimations at the studied sites (dam + HEP passages with and without protection system) based on the entrainment rates of downstream migrating fish into the intake channel, the proportion of them passing through the turbines and the resulting turbine mortality.

Site	Dam	HEP		HEP without protection system		HEP with protection system	
	Proportion (%) of fish passing over the HEP dam in the river <sup>2</sup>	Fish entrainment rate (%) into the intake channel <sup>2</sup>	Turbine mortality rate <sup>2</sup> (%)	Proportion (%) of fish passing through the turbine <sup>3</sup>	Overall fish survival (dam + HEP, %)	Proportion (%) of fish passing through the turbine <sup>4</sup>	Overall fish survival (dam + HEP, %)
Auterrive <sup>1</sup>	97.6	2.4	5.2	2.3	99.9	0.4	99.98
Trois-Villes	8.4	91.6	11	62.8	93.1	7.0	99.2
Gotein	32.4	67.6	11	66.2	92.7	11.6	98.7
Halsou	9.6	90.4	15	90.4	86.4	11.8	98.2

<sup>1</sup> Site without dam in the river.

<sup>2</sup> Following Anonymous, 2002a, 2002b; Voegtli, 2010.

<sup>3</sup> Computed using fish entrainment rate into the intake channel minus fish passing through the fish pass and the evacuation canal (proportions in Table 2).

<sup>4</sup> Computed using mean entrainment rate to the turbine (= proportion of undetected fish in Table 2).

**Table 4**

Three different evaluations of bypass passage minimum efficiency using i) all dataset, ii) a subset of individuals less than 200 mm length, and iii) a subset of individuals less than 190 mm length.

Site	Bypass passage minimum efficiency (%)					
	all individuals		ind. ≤ 200 mm		ind. ≤ 190 mm	
	mean	min–max	mean	min–max	mean	min–max
Auterrive	80.9	75.5–89.2	78.9	74.4–85.3	78.5	71.4–86.4
Trois-Villes	87.5	78.8–97.1	87.2	78.6–96.9	87.7	79.2–96.4
Gotein	80.9	71.2–100.0	78.8	68.9–100.0	76.9	65.7–100.0
Halsou	87.0	78.8–94.4	86.9	78.3–94.0	85.7	75.0–95.5

(Table 2). Excepting for Trois-Villes site (where migration times were longer), 50% of the smolts passed through the bypass in less than 23 min after release and 75% of them in less than 2 h 15 min. Longer fish migration times were generally observed for day releases: median migration times for day releases ranged between 37 min and 4 h 24 min, while median migration times for night releases ranged from 10 to 54 min. Despite some exceptionally long delays, all migrating fish successfully crossed the HEP in less than 2 days.

In three of the four studied sites the overall fish survival through the dam/HEP installations was lower without fish protection devices (93.1% at Trois-Villes, 92.7% at Gotein and 86.4% at Halsou site) than with them (above 98% for all; Table 3). The Auterrive site, with nearly 100% fish survival with or without protection device (Table 3), is a special case because of the absence of dam in the river and a low turbine discharge compared to the river discharge during salmon smolt migration period, resulting in a very low fish entrainment into the intake channel.

#### 4. Discussion

Our observed minimum passage efficiency through the bypass ranged from 80.9% to 87.5% on average depending on the studied site (Table 1). As stated in Section 2.4, the used RFID technology did not allow the detection of fish passing through the turbine and we assumed that all undetected fish passed through this way resulting in a minimum passage efficiency estimate, the real efficiency being certainly higher. Although our passage efficiency estimates are acceptable, an additional step is needed to confirm or adjust the passage efficiency values observed here with direct estimates of passages through the turbines.

We observed some variability among the released groups (ranging from 71.2 to 100%), but the bypass passage efficiency was never below 70%. In comparison with previous efficiency studies of other rack types (different bar spacing, inclination or orientation, summarized in Table 5), our results belong to the highest bypass passage efficiencies recorded so far.

Our results show some individual-based variability in migration time. The first HEP passages were detected in less than 10 min after fish release in the intake channel, and 75% of the individuals detected in the bypass section successfully passed the HEP in a few hours (Table 2). The groups released in the evening or in the morning had migration times much longer than those released at night. Hansen and Jonsson (1985) already observed this difference in migration time between day and night for salmon smolts. Studying the downstream migration of wild salmon smolts at the Nive River (Halsou site), Larinier and Boyer-Bernard (1991) showed lower migration activity between 9 and 13 h and between 16 and 18 h, while migration peaked during the night, between 22 h and midnight. This daily variation in fish activity certainly explains the observed differences in migration time. If we only account for groups released at night, we found that 75% of the individuals detected in the bypass section successfully crossed the HEP in less than 1 h in 11 of 16 released groups, in less than 2 h in four other groups and in 3 h 50 min for the remaining group. Individuals with extremely long migration times were rare exceptions that might be either immature for downstream migration or individuals that, after losing their successful congeners, remained disoriented in the intake channel. Overall our findings clearly show short migration times for the tested protection systems as the great majority of fish cross the HEP installations in a few hours.

These high efficiency levels (Table 1) and short migration times (Table 2) were relatively stable among sites and tested groups of individuals. Also, at the level of the dam/HEP equipped with the tested fish protection systems, always more than 88% of the fish passed through a non-turbine route, resulting in an overall fish survival always exceeding 98% (Table 3). These results seem satisfactory and confirm the interest of inclined and oriented racks with narrowly spaced bars for safe fish downstream migration through HEP sites.

The fish guidance efficiency, commonly used to evaluate fish protection systems (Bunt et al., 2012; Noonan et al., 2012), could not be measured during our study (see 2.4 Section) and this parameter remains to be evaluated in future studies. Although we did not explicitly evaluate the fish guidance efficiency of the studied racks, the rapid detection of individuals observed near the bypass entrances and in the bypass section (Table 2) could suggest a good guidance of fish. If we omit time, our observed minimum bypass efficiency, between 80.9% and 87.5%, could be used as a proxy of the guidance efficiency. Nevertheless, the guidance of the studied racks is still improvable as we observed some fishes approaching the entrances but not entering immediately. The antennas installed in the bypass entrance in the Auterrive and Halsou sites also detected some individuals never detected afterwards in the bypass sections. It seems therefore that some fish hesitated and spent time upstream the rack before finally entering either the bypass, other ways (fish pass, evacuation canal) or probably passing through the rack and turbines. The velocity acceleration and higher hydraulic turbulence in the bypass entrances might explain fish hesitation (Haro et al., 1998) and should be considered as key points for bypass passage attractiveness.

The efficiency of a fishway depends not only on its general design criteria but also on its implementation in a particular site (i.e. accounting for flow directions and turbulences close to the rack) and on the functioning of the HEP (i.e. the variability in turbine discharge for electricity production). With the majority of passages occurring through the bypass (Table 1), our study shows first that fish passes were not useful for downstream migration because their upstream entrances were not positioned close to the racks. At Auterrive site, we observed a preferential incoming flow on the right bank (unexpected when the rack was designing) leading to a water recirculation zone at the top of the rack along the left bank. Fish individuals spent time in this zone, with no bypass entrance, probably at the expense of the system attractiveness and efficiency (as stated by Larinier and Travade, 1999). Based on this finding and in addition to other general criteria (Courret and Larinier, 2008), particular attention should be paid on the positioning of the bypass entrances to adapt them to the site-specific flow organization.

Because of the vulnerable status of salmon populations in many French rivers, we opted for using hatchery-reared fishes rather than individuals from wild populations. Previous studies found no difference in downstream passage behavior and success between wild and hatchery-reared smolts (Larinier and Travade, 1999; Nyqvist et al., 2016). However, wild salmon smolts being usually smaller than hatchery ones, the potential effect of body size remains open. In a previous downstream migration survey at Halsou site (Gosset and Travade, 1999), body length of wild salmon smolts ranged from 112 to 280 mm with mean values between 162 and 170 mm depending on the year, while our individuals ranged from 137 to 225 mm, with c. 186 mm mean length. From our findings, a repellent rack effect as a function of fish size cannot be fully discarded (Fig. 2), suggesting that our results may not be relevant for wild salmon populations. However, our results are only marginally affected by body size. Indeed, if we estimate the bypass passage minimum efficiencies only with individuals less than 200 mm or even 190 mm, to get closer to wild salmon smolts body size, the passage efficiencies only slightly decrease in three of the studied sites, and mean efficiencies are never below 75% (Table 4), suggesting that our results and main conclusions can reasonably be applied to wild populations of salmon smolts.

More than 88% of fish passing through a non-turbine route (Table 3) and more than 98% of juvenile fish survival values exceed, for instance, regional goals established for each dam along the Columbia River (USA) to allow for salmon stocks recovery: passage of at least 80% of juvenile migrants through a non-turbine route and 95% juvenile fish survival (Ferguson et al., 1998). At first sight, one could believe that fish survival values estimated without protection systems, ranging from 86% to 93% at Trois-Villes, Gotein and Halsou sites (Table 3), do not significantly impact downstream migrating fish. It could seem true for a single HEP, but cascades of them are usually placed along a river course, greatly increasing the overall impact. For example, the overall survival of fish crossing our three HEP installations without protection systems (Trois-Villes, Gotein and Halsou), if cumulated together, would achieve only 74.6%, but the fish survival increases to 96.1% if the tested protection systems are included. This example shows clearly the ecological gain we can obtain if such fish protection devices are implemented at the catchment scale.

## 5. Conclusions

We can conclude that the fish protection racks tested here significantly improve the conditions for downstream migration as they result in high and stable efficiency levels and short migration times, allowing to recognize them as functional downstream fish passage solutions for wild Atlantic salmon populations. Further studies are however needed, including other downstream migrating species (e.g. eels) and more HEPs with higher turbine discharge.

## Declaration of interest

None.

## Acknowledgments

The authors would like to thank CAM Energy, Société Hydroélectrique de Gotein, EDF Unité de Production Sud Ouest and the participation of the Unité Spécialisée Migrateur Adour de l'AFB, MIGADO, AAPPMA du Gave d'Oloron, Syndicat Mixte de Production d'eau d'Auterrive and P' Institut of Poitiers. The study was financially supported by the AFB and EDF, in relation with the research and innovation FITHydro project funded by the Horizon 2020 Framework Programme of the European Union (www.fithydro.eu; Grant agreement No 727830). The study obtained permission of French local authorities Préfecture des Pyrénées-Atlantiques N°64-2015-00062. Special thanks to Pablo Tedesco and to two scientific referees for their comments which greatly improved the manuscript.



Appendix

See Tables 5 and 6.

**Table 5**  
Summary of results about bypass passage efficiencies from present and previous studies (in bold, mean efficiencies higher than 80%).

Reference	Site (River)	Max intake capacity $Q_{HEP}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	Protection rack		Bypass		Bypass passage efficiency			
			bar spacing (mm)	inclination to the horizontal	orientation to the flow	Nb of entrances	Discharge (proportion of $Q_{HEP}$ %)	Mean	Max	Min
<b>present study</b>	<b>Auterive (Gave d'Oloron)</b>	<b>9.5</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>5.3</b>	<b>80.7</b>	<b>89.2</b>	<b>75.5</b>
<b>present study</b>	<b>Trois-Villes (Saison)</b>	<b>4.1</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>1</b>	<b>4.9</b>	<b>87.5</b>	<b>97.1</b>	<b>78.8</b>
<b>present study</b>	<b>Gotein (Saison)</b>	<b>6.7</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>5.7</b>	<b>80.9</b>	<b>100</b>	<b>71.2</b>
<b>present study</b>	<b>Övre Finnsjö</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>35</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>6–8</b>	<b>84</b>	<b>–</b>	<b>–</b>
Croze (2008)	Guilhot (Ariège)	27	32	45	90	1	1.9	75	96.1	64
Croze (2008)	las Rives (Ariège)	39	40	45	90	1	2.25	49	62	37.3
Croze (2008)	Las Mijeannes (Ariège)	40	30	45	90	1	1.5–4.2	32	61.2	14
Travade et al. (1999)	<b>St Critq (Gave d'Ossau)</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>55</b>	<b>90</b>	<b>2</b>	<b>1.6–4.3</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>62.6</b>
Chanseau et al. (1999)	Bedous (gave d'Aspe)	28	30	> 60	90	1	2–5.2	55	74.3	38.4
Travade et al. (1996)	Soeix (Gave d'Aspe)	34.8	35	> 60	90	1	1.4	59	89	42
Croze (2008)	Crampagna (Ariège)	24	30	75	90	1	3–6	65.6	80.4	50
Chanseau et al. (2002)	Castetarbe (Gave de Pau)	40	25	75	90	3	2.4–3.6	33	–	–
Croze et al. (1999)	Camon (Garonne)	85	40	79	90	1	3.3	73	85	57
Bosc et al. (2016)	Camon (Garonne)	85	20	79	90	1	5	37.1	66	4
Bosc et al. (2016)	Pointis (Garonne)	60	20	79	90	2	10.6–24	54	76	36
Nettles and Gloss (1987)	Wadhams (Boquet River)	4.25	25	90	90	1	2.8–4.3	50	–	–
Simmons (n.d.)	<b>Lower Saranac HEP (Saranac)</b>	<b>31.6</b>	<b>25</b>	<b>90</b>	<b>45</b>	<b>1</b>	<b>2.6</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>80</b>
Environmental Research and Consulting (1996)	Upper Greenwich (Batten Kill)	21.5	25	90	45	1	–	64	–	–
Nettles and Gloss (1987)	<b>Wadhams (Boquet River)</b>	<b>4.25</b>	<b>25</b>	<b>90</b>	<b>36</b>	<b>1</b>	<b>10.6–24</b>	<b>100</b>	<b>–</b>	<b>–</b>
Heiß (2015)	<b>Herting HEP (Atran)</b>	<b>40</b>	<b>15</b>	<b>90</b>	<b>30</b>	<b>1</b>	<b>0.75</b>	<b>89.5</b>	<b>–</b>	<b>–</b>
Chanseau et al. (2002)	<b>Baigts (Gave de Pau)</b>	<b>90</b>	<b>30</b>	<b>76</b>	<b>30</b>	<b>2</b>	<b>2–13.5</b>	<b>92.5</b>	<b>–</b>	<b>–</b>
Lariniér & Boyer-Bernard (1991)	<b>Halsou (Nive)</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>64</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>94.5</b>	<b>100</b>	<b>87.5</b>
Gosset et al. (1998)	Halsou (Nive)	30	30	64	25	1	1.5–2	56	78	32
<b>present study</b>	<b>Halsou (Nive)</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>64</b>	<b>15</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>87</b>	<b>94.4</b>	<b>78.8</b>
Charles Ritzl Associates (1993)	<b>Hillsborough Mills Dam (Souhegan)</b>	<b>6.8</b>	<b>25</b>	<b>90</b>	<b>~10</b>	<b>1</b>	<b>12.5–16.6</b>	<b>97</b>	<b>–</b>	<b>–</b>
Bach et al. (2004) in Tétard et al. (2016)	Poutès (Allier)	28	30	> 60	~20*	1	2.5	58	–	–
Tétard et al. (2016)	Poutès (Allier)	28	30	> 60	~20*	1	7.1	66	–	–
Ovidio et al. (2017)	Lorcé (Ambliève)	26	41	90	0	1	0.7	15.3	22	6

– the information is not available in the publication.  
\* Particular situation: rack orientation is not useful for fish guidance.

**Table 6**  
Detailed characteristics of the study sites and their fish protection systems.

Site (River)	HEP				Fish protection rack				Bypass					
	intake canal length (m)	intake capacity $Q_{HEP}$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	flow velocity upstream the rack* ( $m \cdot s^{-1}$ )	inclination to the horizontal (°)	orientation to the flow (°)	submerged surface ( $m^2$ )	normal flow velocity* ( $m \cdot s^{-1}$ )	bar spacing (mm)	discharge ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	(% of $Q_{HEP}$ )	number of entrances	Width (m)	Entrance depth (m)	Velocity ( $m \cdot s^{-1}$ )
Autterive (Gave d'Oloron)	400	7.8 (9.5)	0.36–0.45 (0.44–0.55)	26°	90°	32.5	0.24 (0.29)	20	0.5	6.4% (5.3%)	2	0.5 + 0.7	0.5–1.2	0.35–0.83
Trois-Villes (Saison)	550	3.9 (4.1)	0.37 (0.38)	26°	90°	24.8	0.16 (0.16)	20	0.2	5.1% (4.9%)	1	1.0	0.5	0.4
Gotein (Saison)	780	6.7 (6.7)	0.40 (0.40)	26°	90°	27.5	0.24 (0.24)	20	0.38	5.7% (5.7%)	2	0.8 + 0.8	0.5	0.47
Halsou (Nive)	925	20–23.8 (30)	0.6–0.72 (0.91)	64°	15°	76	0.26–0.31 (0.39)	20	1–1.5	5% (5%)	1	1.38	≥0.5	0.7–1.4

\* Mean value during the study (limit or target value fixed by French authorities).

## References

- Anonymous, 2002a. Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique – Proposition d'aménagement – Le Saison. Dossier S.I.E.E. – GHAAPE n° TE010803.
- Anonymous, 2002b. Simulation des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique – Proposition d'aménagement – Le Gave D'Oloron. Dossier S.I.E.E. – GHAAPE n° TE010803.
- Baudoin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremiski, W., Steinbach, P., Voegtle, B., 2015. Assessing the passage of obstacles by fish. Concepts, design and application. Available from: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/183173>.
- Bunt, C.M., Castro-Santos, T., Haro, A., 2012. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. River Res. Appl. 28, 457–478. <https://doi.org/10.1002/rra.1565>.
- Chanseau, M., Croze, O., Favry, N.D., Bosc, S., Larinier, M., Travade, F., 1997. Expérimentation d'un dispositif de dévalaison pour les juvéniles de saumon atlantique : usine hydroélectrique de Baigts (Gave de Pau – 64) année 1997. GHAAPE RA 97.08.
- Courret, D., Larinier, M., 2008. Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport GHAAPE RA.08.04. 60p + annexe.
- Courret, D., Larinier, M., David, L., Chatellier, L., 2015. Development of criteria for the design and dimensioning of fish-friendly intakes for small hydropower plant. In: International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage, Groningen. Available from: [http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1942&context=fishpassage\\_conference](http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1942&context=fishpassage_conference).
- Croze, O., 2008. Assessment of downstream fish bypasses for Atlantic salmon smolts at four hydroelectric facilities on the Ariège River (France). In: American Fisheries Society Symposium. pp. 123–140.
- Directive 2009/28/EC, 2009. Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE.
- Ferguson, J.W., Poe, T.P., Carlson, T.J., 1998. Surface-oriented Bypass Systems for Juvenile Salmonids on the Columbia River, USA. In: Jungwirth, M., Schmutz, S., Weiss, S. (Eds.), Fish Migration and Fish Bypasses, Oxford, England, pp. 281–299.
- Gosset, C., Travade, F., 1999. Etude de dispositifs d'aide à la migration de dévalaison des salmonidae: Barrières comportementales. Cybium 23, 45–66.
- Hansen, L.P., Jonsson, B., 1985. Downstream migration of hatchery-reared smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in the River Imsa, Norway. Aquaculture, Salmonid Smoltification II 45, 237–248. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(85\)90273-X](https://doi.org/10.1016/0044-8486(85)90273-X).
- Haro, A., Odeh, M., Noreika, J., Castro-Santos, T., 1998. Effect of water acceleration on downstream migratory behavior and passage of Atlantic salmon smolts and juvenile American shad at surface bypasses. Trans. Am. Fish. Soc. 127, 118–127. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1998\)127<0118:EOWAOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1998)127<0118:EOWAOD>2.0.CO;2).
- Larinier, M., Boyer-Bernard, S., 1991. Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. Bull. Fr. Pêche Piscic. 321, 72–92. <https://doi.org/10.1051/kmae:1991009>.
- Larinier, M., Dartiguelongue, J., 1989. La circulation des poissons migrateurs : le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. Bull. Fr. Pêche Piscic. 1–87. <https://doi.org/10.1051/kmae:1989011>.
- Larinier, M., Travade, F., 2002. Downstream migration: problems and facilities. Bull. Fr. Pêche Piscic. 364, 181–207.
- Larinier, M., Travade, F., 1999. The development and evaluation of downstream bypasses for juvenile salmonids at small hydroelectric plants in France. In: Odeh, M. (Ed.), Innovations in Fish Passage Technology. pp. 25–42.
- Limburg, K.E., Waldman, J.R., 2009. Dramatic declines in North Atlantic diadromous fishes. BioScience 59, 955–965. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.7>.
- Marohn, L., Prigge, E., Hanel, R., 2014. Escapement success of silver eels from a German river system is low compared to management-based estimates. Freshwater Biol. 59, 64–72. <https://doi.org/10.1111/fwb.12246>.
- Montén, E., 1985. Fish and Turbines: Fish Injuries During Passage Through Power Station Turbines. Norstedts Tryckeri.
- Noonan, M.J., Grant, J.W.A., Jackson, C.D., 2012. A quantitative assessment of fish passage efficiency. Fish Fish. 13, 450–464. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00445.x>.
- Nyqvist, D., Greenberg, L.A., Goerig, E., Calles, O., Bergman, E., Ardren, W.R., Castro-Santos, T., 2016. Migratory delay leads to reduced passage success of Atlantic salmon smolts at a hydroelectric dam. Ecol. Freshwater. Fish. 26, 707–718. <https://doi.org/10.1111/eff.12318>.
- OTA, 1995. Fish passage technologies: protection at hydropower facilities. OTA-ENV-641. ed.
- Ovidio, M., Dierckx, A., Bunel, S., Grandry, L., Spronck, C., Benitez, J.P., 2017. Poor performance of a retrofitted downstream bypass revealed by the analysis of approaching behaviours in combination with a trapping system. River Res. Appl. 33, 27–36. <https://doi.org/10.1002/rra.3062>.
- Raynal, S., Chatellier, L., Courret, D., Larinier, M., David, L., 2015. Study on fish-friendly inclined and angled trashracks. Houille Blanche 31–36. <https://doi.org/10.1051/lhb/20150030>.
- Raynal, S., Chatellier, L., David, L., Courret, D., Larinier, M., 2012. Définition de prises d'eau ichtyocompatibles – Pertes de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles et champs de vitesse à leur approche. Rapport Pole RA11.02.
- Verbiest, H., Breukelaar, A., Ovidio, M., Philippart, J.-C., Belpaire, C., 2012. Escapement

- success and patterns of downstream migration of female silver eel *Anguilla anguilla* in the River Meuse: Silver eel migration in River Meuse. *Ecol. Freshwater Fish* 21, 395–403. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2012.00559.x>.
- Voegtli, B., 2010. Simulations des mortalités induites par les aménagements hydroélectriques lors de la migration de dévalaison des smolts de saumon atlantique. Rapport ECOGEE E080501.01.
- ### References of Appendix
- Bach, J.-M., Caut, I., Lelièvre, M., Vaillard, J., 2004. Suivi de la dévalaison 2004 des saumoneaux au droit du barrage de Poutès. Saint Pourçain sur Sioule : Rapport LOGRAMI.
- Bosc, S., Nars, A., Menchi, O., 2016. Contrôle de la migration des smolts de saumon atlantique en dévalaison au niveau des dispositifs de piégeage et de transport de Camon et de Pointis sur la Garonne. Campagne 2015. Rapport MIGADO.
- Calles, O., n.d. What goes up must come down: New techniques to improve downstream fish passage. Available from: <http://docplayer.net/11296169-What-goes-up-must-come-down-new-techniques-to-improve-downstream-fish-passage-olle-calles.html>.
- Chanseau, M., Barriere, O., Travade, F., 2002. Etude de la migration des juvénils de saumon atlantique (*Salmo salar*) au niveau des aménagements hydroélectriques de Castetarbe Baigts-de-Béarn et Puyoo sur le Gave de Pau en 2001. Rapport EDF MIDIVAL (No. HP-76/02/035/A).
- Chanseau, M., Larinier, M., Travade, F., 1999. Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radiotélémétrie. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 99–120. <https://doi.org/10.1051/kmae:1999008>.
- Charles Ritzi Associates, 1993. Report of Results of a Study of the Effectiveness of Downstream Fish Passage Facilities at the Pine Valley Hydroelectric Project (FERC No. 9282) Souhegan River, New Hampshire.
- Croze, O., Chanseau, M., Larinier, M., 1999. Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 121–140. <https://doi.org/10.1051/kmae:1999009>.
- Environmental Research and Consulting, Inc., 1996. Evaluation of the fish passage effectiveness of angled trash racks and bypasses at the Upper and Middle Greenich water power projects (Rapport FERC Project No. 6904-001 and 6903-001).
- Gosset, C., Travade, F., Labastie, C., Garaicoechea, C., 1998. Etude de dispositifs de dévalaison pour smolts de saumon atlantique: influence de la lumière sur l'efficacité des exutoires de dévalaison. Centrale hydroélectrique de Halsou (Nive - 64-). Rapport de contrat INRA/EDF.
- Heiß, M., 2015. Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden (Master's Thesis). Ludwig – Maximilians – Universität München.
- Nettles, D.C., Gloss, S.P., 1987. Migration of landlocked Atlantic Salmon smolts and effectiveness of a fish bypass structure at a small-scale hydroelectric facility. *North Am. J. Fish. Manage.* 7, 562–568. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1987\)7<562:MOLASS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1987)7<562:MOLASS>2.0.CO;2).
- Simmons, R.A., n.d. Effectiveness of a fish bypass with an angled bar rack at passing atlantic salmon and steel head trout smolts at the lower Saranac hydroelectric project. In: Oden M. (Ed.), *Advances in Fish Passage Technology: Engineering Design and Biological Evaluation*. American Fisheries Society, Bethesda. pp. 95–102.
- Tétard, S., Lemaire, M., Martin, P., De Oliveira, E., 2016. Comportement des smolts de saumon atlantique (*Salmo salar*) au voisinage du barrage de Poutès (Allier, France). Bilan des études de télémétrie acoustique réalisées en 2014 et 2015, Rapport EDF.
- Travade, F., Gouyou, C., De Faveri, N., 1999. Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) à l'aménagement hydroélectrique de St. Cricq sur le gave d'Ossau. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 157–180. <https://doi.org/10.1051/kmae:1999011>.
- Travade, F., Larinier, M., Ingendahl, D., Bach, J.-M., Pujo, D., Barracou, D., 1996. Expérimentation d'un dispositif de dévalaison pour les juvéniles de saumon atlantique (année 1994) : usine hydroélectrique de Soeix (Gave d'Aspe – 64). Rapport GHAAPE 96.02.

# Protection des poissons en dévalaison au niveau des aménagements hydroélectriques :

Efficacité des efficacité des exutoires associés à  
des grilles inclinées ou orientées

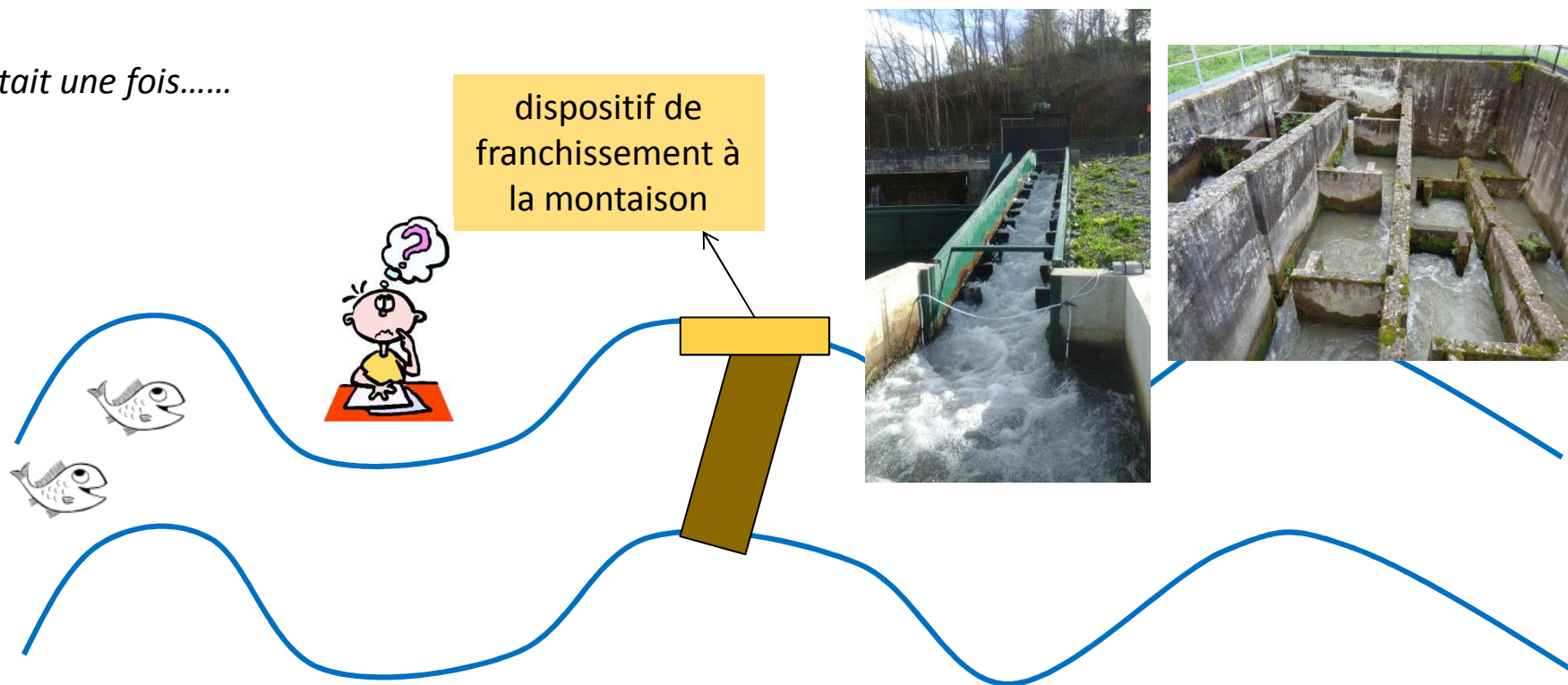


**TOMANOVA Sylvie, COURRET Dominique, DE OLIVEIRA Eric, FREY  
Aurélien, LAGARRIGUE Thierry, MATAIX Vincent, RENE Alexis,  
RICHARD Sylvain & TETARD Stéphane**



# Fish & dam story

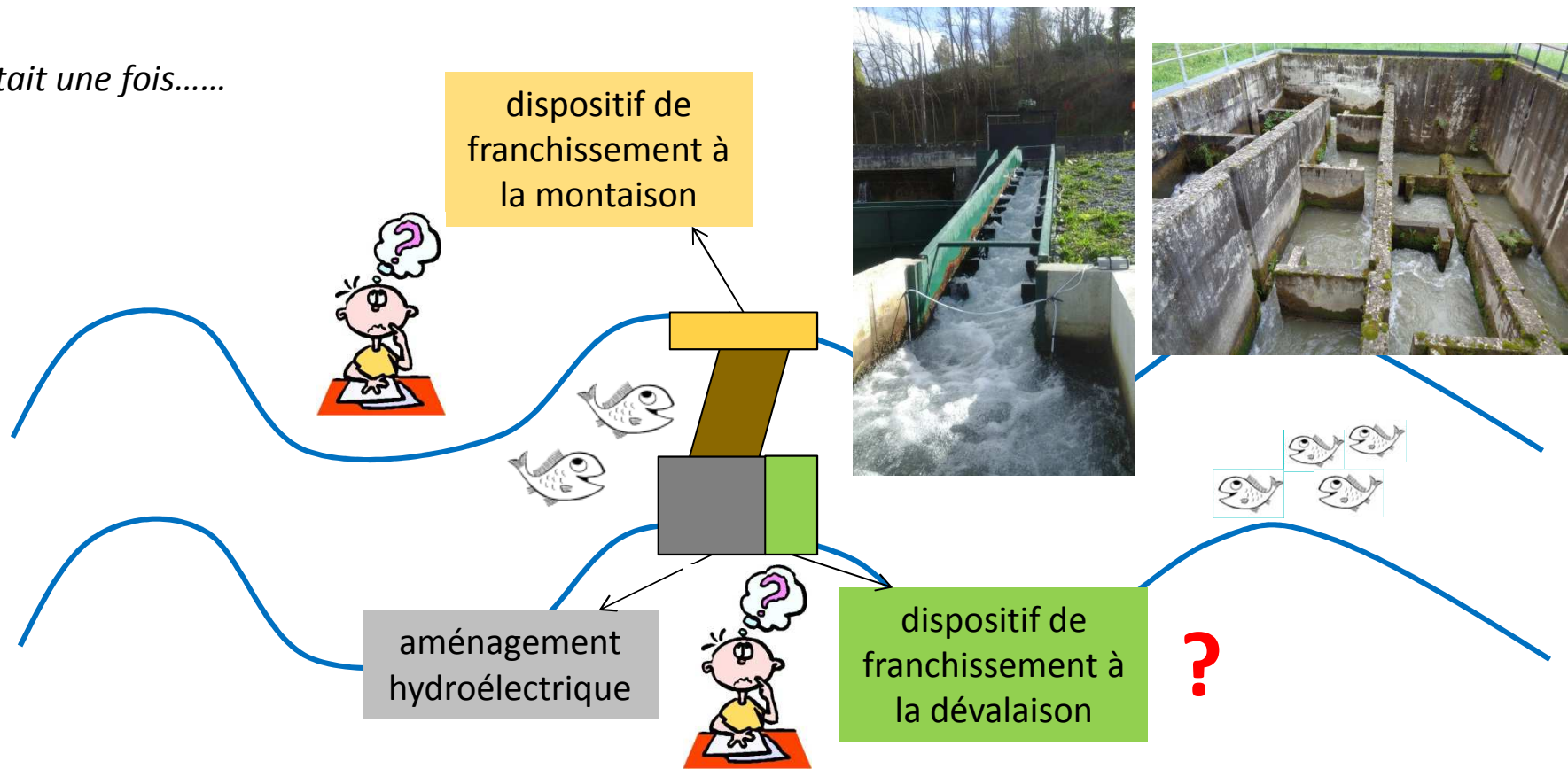
*Il était une fois.....*





# Fish & dam story

*Il était une fois.....*



<http://oldrivershannon.com/2013/11/08/silver-eels-river-shannon/>



A. Richard, AFB



POUR LA BIODIVERSITÉ  
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT



Pôle Ecohydraulique



# Dispositifs de franchissement à la dévalaison

grille pour retenir les déchets végétaux  
(protection de la turbine, 60-70mm)



resserrement des barreaux (30-40mm) pour  
protéger les poissons



+ d'adaptations pour protéger les poissons



site (rivière)	Grille				efficacité de l'exutoire (%)		référence
	Débit max turbiné (m3/s)	Espacement entre les barreaux(mm)	Inclinaison par rapport à l'horizontal	Orientaton par rapport au courant d'eau	moyenne	min - max	
Guilhot (Ariège)	27	32	45	90	75	64 - 96,1	Croze (2008)
las Rives (Ariège)	39	40	45	90	49	37,3 - 62	Croze (2008)
Las Mijeannes (Ariège)	40	30	45	90	32	14 - 61,2	Croze (2008)
St Cricq (Gave d'Ossau)					80	62,6 - 100	Travade et al. (1999)
Bedous (gave d'Aspe)					55	38,4 - 74,3	Chanseau et al. (1999)
Soeix (Gave d'Aspe)	34,8	35	>		59	42 - 89	Travade et al. (1996)
Crampagna (Ariège)	24	30			65,6	50 - 80,4	Croze (2008)
Castetarbe (Gave de Pau)	40	25	75	90	33		Chanseau et al. (2002)
Camon (Garonne)	85	40	79	90	73	57 - 85	Croze et al. (1999)
Baigts (Gave de Pau)	90	30	76	30	92,5		Chanseau et al. (2002)
Halsou (Nive)	30	30	64	25	94,5	87,5 - 100	Larinier et Boyer-Bernard (1991)
Halsou (Nive)	30	30	64	25	56	32 - 78	Gosset et al. (1998)

mais efficacité souvent insuffisante

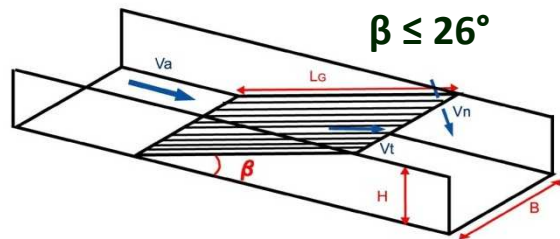
et variable

# Dispositifs de franchissement à la dévalaison

(selon Courret & Larinier, 2008)

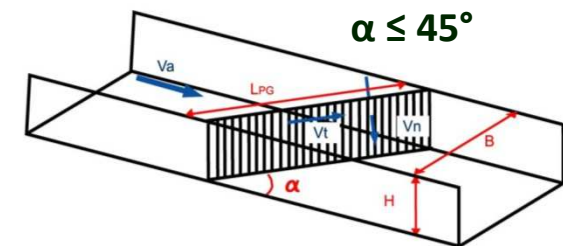
2008

Plan de grille incliné par rapport à l'horizontale



- **écartement des barreaux** :  $\leq 25$  mm si saumon/truite,  $\leq 15-20$  mm si anguille;
- **vitesse normale**  $V_n \leq 0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (pas de plaquage)

Plan de grille orienté par rapport à la direction de l'écoulement



associé à un ou plusieurs **exutoire(s)** et une goulotte de dévalaison (**débit** entre **2-5%  $Q_{turb}$** )



Las Rives (construction)



Halsou

AGENCE FRANÇAISE  
POUR LA BIODIVERSITÉ  
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT



Pôle Ecohydraulique

# Premiers tests au laboratoire positifs



Etudes hydrauliques  
(Raynal *et al.*, 2012, 2013, 2015)



- pertes de charge acceptable pour la production d'électricité
- pas de risque de plaquage pour les poissons
- bonne courantologie = a priori bon guidage

tests sur les poissons et grille (20mm) inclinée (barbeaux, chevesnes, hotus)  
(Cuchet *et al.* 2011)

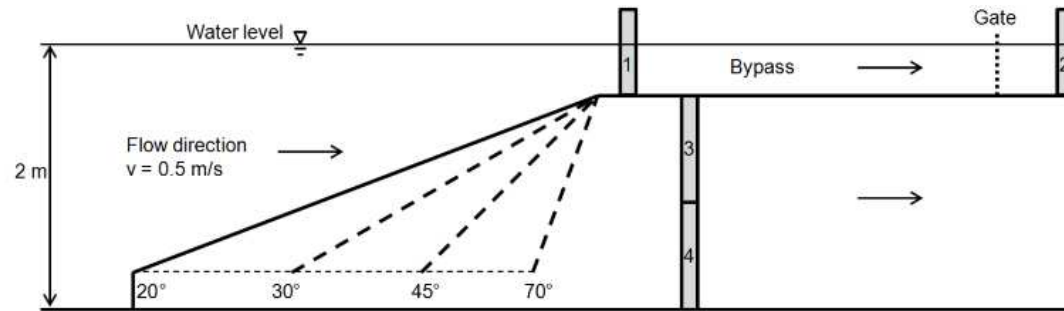
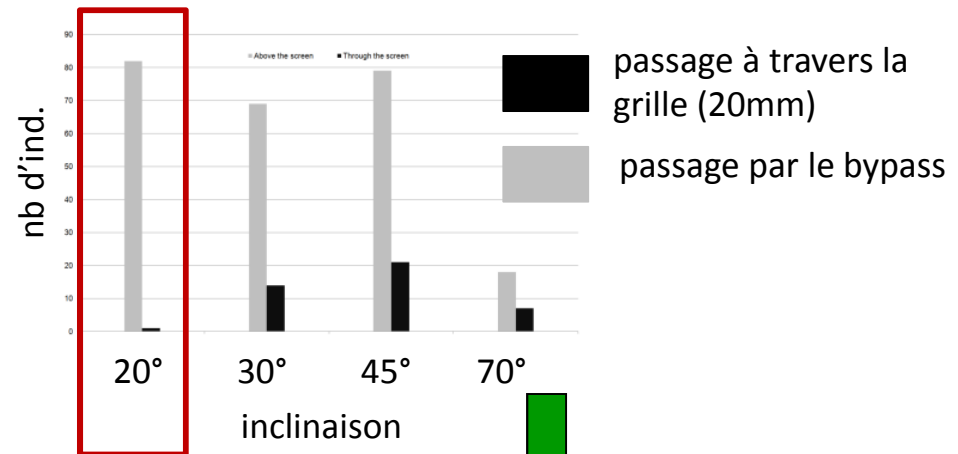


Figure 1 Longitudinal section of the experimental setup: PIT antennas marked grey



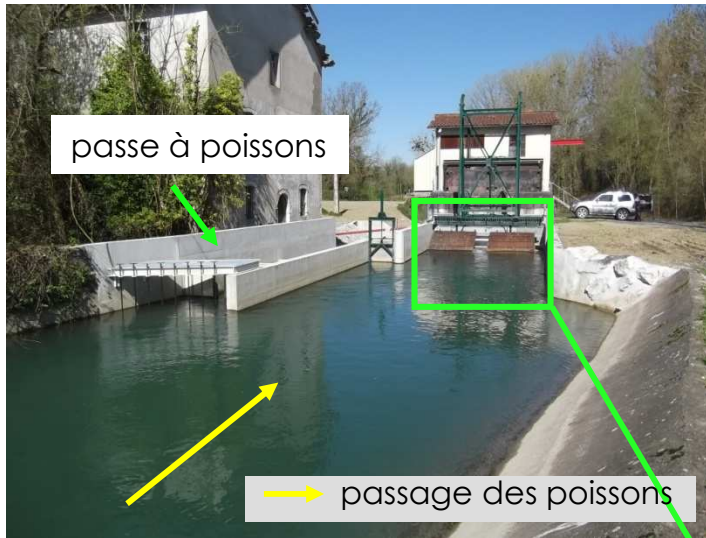
faible inclinaison favorise le guidage et limite les passages à travers la grille



# Et comment ça marche in situ?

2015

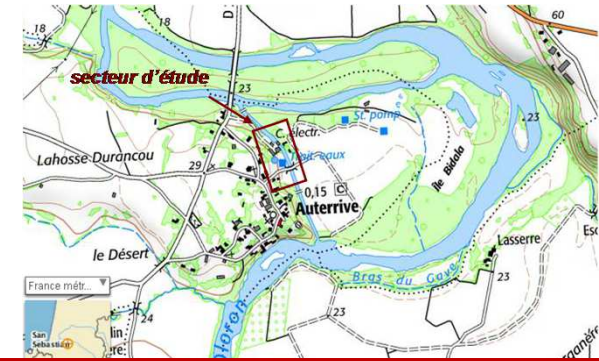
Auterrive ( $Q_{Turb} = 7,8\text{m}^3/\text{s}$ , vitesse d'approche = 0.36 - 0.45 m/s,  $Q_{exu}=6,4\%$ )



smolts de saumon atlantique\*



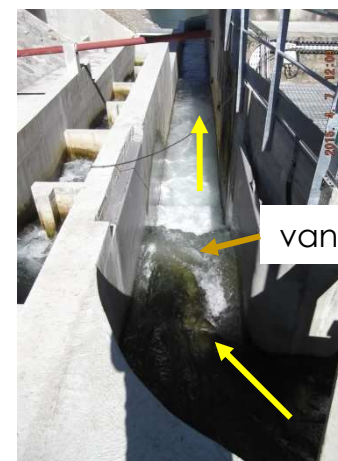
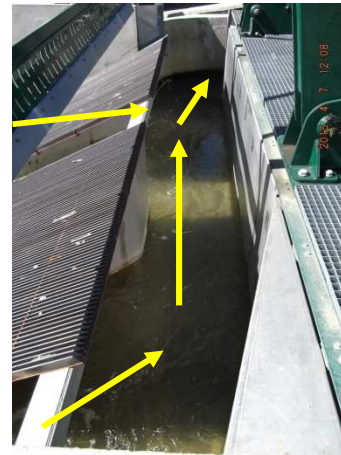
marquage pit-tag / lâchers de plusieurs lots / détection de passage par les antennes RFID



**80,7%** d'ind. (min-max: 75,5 – 89,2%) sont passés par exutoire/goulotte de dévalaison  
3,8% d'ind. sont passés par la passe à poissons



Grille inclinée 26°, 20mm, 2 exutoires



vanne « anti-retour »

\*<http://florenceellerie.over-blog.com/article-illustrations-animalieres-truitelle-tacon-smolt-121694933.html>

## Et comment ça marche in situ?

2016

**Trois-Ville** ( $Q_{Turb} = 3,9\text{m}^3/\text{s}$ , vitesse d'approche = 0.37 m/s,  $Q_{exu}=5,1\%$ ) smolts de saumon atlantique\*

**Gotein** ( $Q_{Turb} = 6,7\text{m}^3/\text{s}$ , vitesse d'approche = 0.40 m/s,  $Q_{exu}=5,2\%$ )

**Halsou** ( $Q_{Turb} = 20-23,8\text{m}^3/\text{s}$ , vitesse d'approche = 0.6-0,72 m/s,  $Q_{exu}=5\%$ )



Grille inclinée 26°,  
20mm, 1 exutoire

**87,5%** d'ind. (min-max: 78,8 – 97,1%) sont  
passés par exutoire/goulotte de dévalaison  
4,8% d'ind. sont passés par la passe à poissons



Grille inclinée 26°,  
20mm, 2 exutoires

**80,9%** d'ind. (min-max: 71,2 – 100%) sont passés  
par exutoire/goulotte de dévalaison  
1,9% d'ind. sont passés par la passe à poissons



Grille orientée 15°,  
inclinée à 64°  
20mm, 1 exutoire

**84,5-87%** d'ind. (min-max: 72 – 94,4%) sont  
passés par exutoire/goulotte de dévalaison  
0% d'ind. sont passés par la passe à poissons

marquage pit-tag / lâchers de  
plusieurs lots / detection de  
poissons RFID

\*<http://florencecellerie.over-blog.com/article-illustrations-animalieres-truitelle-tacon-smolt-121694933.html>



# Et comment ça marche in situ?

**! Etude en cours ! résultat à mi-temps !**

**2017**

**Las Rives** ( $Q_{Turb} = 41,8\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=3,2\%$ )

**Las Mijeannes** ( $Q_{Turb} = 39,1\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=3,5\%$ )

**Guilhot** ( $Q_{Turb} = 32\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=7,1\%$ )

**Pébernat** ( $Q_{Turb} = 40-50\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=4-5\%$  et plus si déversement)

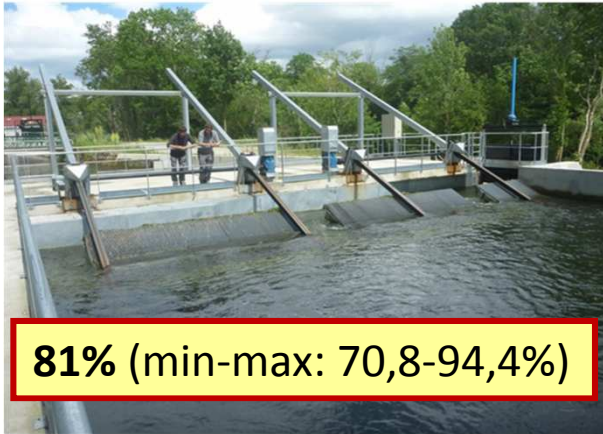
smolts de saumon atlantique\*



Radiotélémetrie:  
marquage par les émetteurs  
radio/ détection des voies de  
passage par les antennes

3 grilles inclinées à  $26^\circ$ ,  
20mm,  
3 exutoires

Las Rives



Las Mijeannes



Guilhot



Pébernat



1 grille orientée en  
prolongement du berge  
20mm,  
1 exutoire



# Et comment ça marche in situ?

**! Etude en cours ! le 1<sup>er</sup> mi-temps n'est pas fini !**

**2018**

**Las Rives** ( $Q_{Turb} = 41,8\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=3,2\%$ )

**Las Mijeannes** ( $Q_{Turb} = 39,1\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=3,5\%$ )

**Guilhot** ( $Q_{Turb} = 32\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=7,1\%$ )

**Pébernat** ( $Q_{Turb} = 40-50\text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{exu}=4-5\%$  et plus si déversement)

anguille (stade argenté)



Radiotélémétrie:  
marquage par les émetteurs  
radio/ détection des voies de  
passage par les antennes

3 grilles inclinées à 26°,  
20mm,  
3 exutoires

1 grille orientée en  
prolongement du berge  
20mm,  
1 exutoire

Las Rives



Las Mijeannes



Guilhot



Pébernat



# Résumé des efficacités de passage par grille/exutoire/goulotte de dévalaison

2015: Auterrive

80,7%

2016: Trois-Ville

87,5%

Gotein

80,9%

Halsou

84,5-87%

2017: Las Rives

81%

Las Mijeann

79,6%

*à confirmer en 2018*

94,3%

Pébernat

76%

2018: Crampagna

100%

Las Rives

100%

*à confirmer en 2019*

100%

Guilhot

100%

Pébernat

95%

## Conclusions:

- retour d'expérience commence à être assez riche
- bonne efficacité de passage : en général > à 80% (aucun lot testé n'est < à 70%)
- efficacité de passage relativement stable entre les sites et les lots testés
- (à confirmer mais) les premiers tests indiquent une bonne efficacité pour les deux espèces cibles (saumon et anguille)



= dispositifs efficaces pour la protection de ces espèces au cours de leur migration vers la mer



## Références citées

- Chanseau, M., O. Barriere, & F. Travade (2002) Etude de la migration des juvénils de saumon atlantique (*Salmo salar*) au niveau des aménagements hydroélectriques de Castetarbe Baigts-de-Béarn et Puyoo sur le Gave de Pau en 2001. Rapport EDF MIDIVAL. : 34.
- Chanseau, M., M. Larinier, & F. Travade (1999) Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Bedous sur le gave d'Aspe étudiés par la technique de marquage-recapture et par radiotélémétrie. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 99–120.
- Courret D. & Larinier M. (2008) Guide pour la conception de prises d'eau « ichtyocompatibles » pour les petites centrales hydroélectriques. Rapport GHAAPPE RA.08.04. 60p + annexe.
- Croze, O., 2008. Assessment of downstream fish bypasses for Atlantic salmon smolts at four hydroelectric facilities on the Ariege River (France). American Fisheries Society Symposium. : 123–140, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.577.8349&rep=rep1&type=pdf>.
- Croze, O., M. Chanseau, & M. Larinier (1999) Efficacité d'un exutoire de dévalaison pour smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et comportement des poissons au niveau de l'aménagement hydroélectrique de Camon sur la Garonne. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 121–140.
- Cuchet M., Muhlbauer M., Ratschan C., Hartlieb A., Brinkmeier B. & others (2011) Behavioural Experiments on the Design of Downstream Fish Passage Facilities for Potamodromous Species. In: *Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering*. p. 2792. Engineers Australia.
- Gosset, C., F. Travade, C. Labastie, & C. Garaicoechea (1998). Etude de dispositifs de dévalaison pour smolts de saumon atlantique: influence de la lumière sur l'efficacité des exutoires de dévalaison. Centrale hydroélectrique de Halsou (Nive - 64-). Rapport de contrat INRA/EDF.
- Larinier, M., & S. Boyer-Bernard (1991) Dévalaison des smolts et efficacité d'un exutoire de dévalaison à l'usine hydroélectrique d'Halsou sur la Nive. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 72–92.
- Raynal S., Chatellier L., David L., Courret D. & Larinier M. (2013) Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Etude de l'alimentation en débit et du positionnement des exutoires de dévalaison au niveau de plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles. Rapport Pole RA12.02.
- Raynal S., Chatellier L., David L., Courret D. & Larinier M. (2012) Définition de prises d'eau ichtyocompatibles - Pertes de charge au passage des plans de grille inclinés ou orientés dans des configurations ichtyocompatibles et champs de vitesse à leur approche. Rapport Pole RA11.02.
- Travade, F., C. Gouyou, & N. De Faveri (1999). Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) à l'aménagement hydroélectrique de St. Cricq sur le gave d'Ossau. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 157–180.
- Travade, F., M. Larinier, D. Ingendahl, J.-M. Bach, D. Pujo, & D. Barracou (1996) Expérimentation d'un dispositif de dévalaison pour les juvéniles de saumon atlantique (année 1994) : usine hydroélectrique de Soeix (Gave d'Aspe - 64). Rapport GHAAPPE 96.02. : 168.



***Merci de votre attention  
Merci aux collègues, collaborateurs et partenaires!***



SOCIÉTÉ  
HYDROÉLECTRIQUE  
DE GOTEIN

