



**HAL**  
open science

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

Sylvie Tomanova, Dominique Courret, Alain Alric, Eric de Oliveira, Thierry Lagarrigue, Stéphane Tétard

### ► To cite this version:

Sylvie Tomanova, Dominique Courret, Alain Alric, Eric de Oliveira, Thierry Lagarrigue, et al.. Etude d'efficacité des exutoires associés à des grilles inclinées ou orientées pour la dévalaison des smolts de saumon atlantique : Études 2016 et synthèse des résultats 2015-2016. AFB; EDF; ECOGEA. 2018. hal-04193670

**HAL Id: hal-04193670**

**<https://ofb.hal.science/hal-04193670>**

Submitted on 1 Sep 2023

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

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

Public Domain

## Etude d'efficacité 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

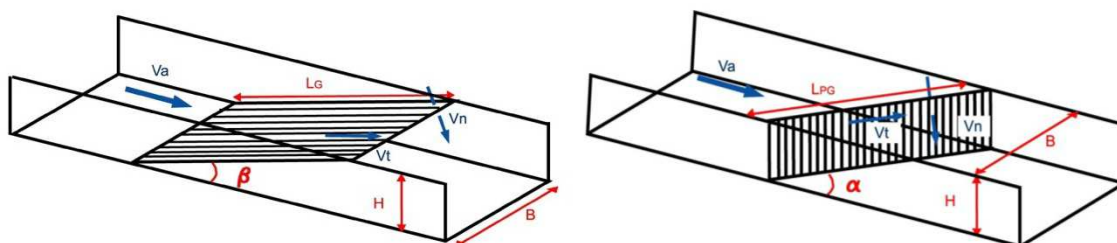
4.3.Particularité du site de Gotein .....	33
<b>5. Rappel du test sur la centrale hydroélectrique d’Auterrive (2015) .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.Méthodologie.....</b>	<b>34</b>
5.1.1. Site d'étude .....	34
5.1.2. Equipement du site en antennes RFID et efficacités de détection .....	35
5.1.3. Marquage 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).

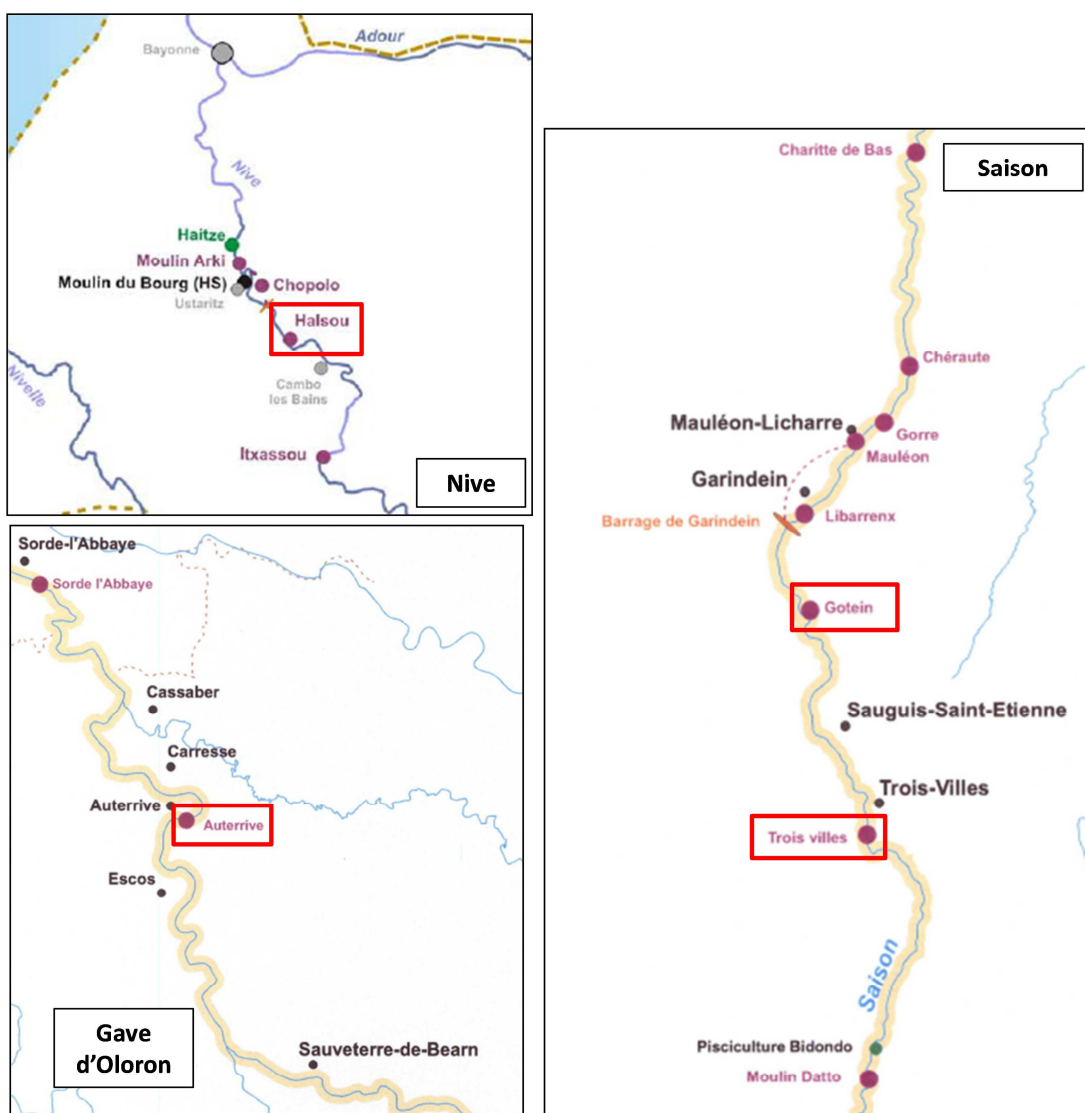
Le retour d'expérience sur l'efficacité d'exutoires associés à des plans de grilles pré-existants est déjà conséquent (Larinier & Travade, 1999 ; Travade et Larinier 2006). Cela a montré que, mis à part dans certaines configurations favorables, il a généralement été difficile d'atteindre des efficacités 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).

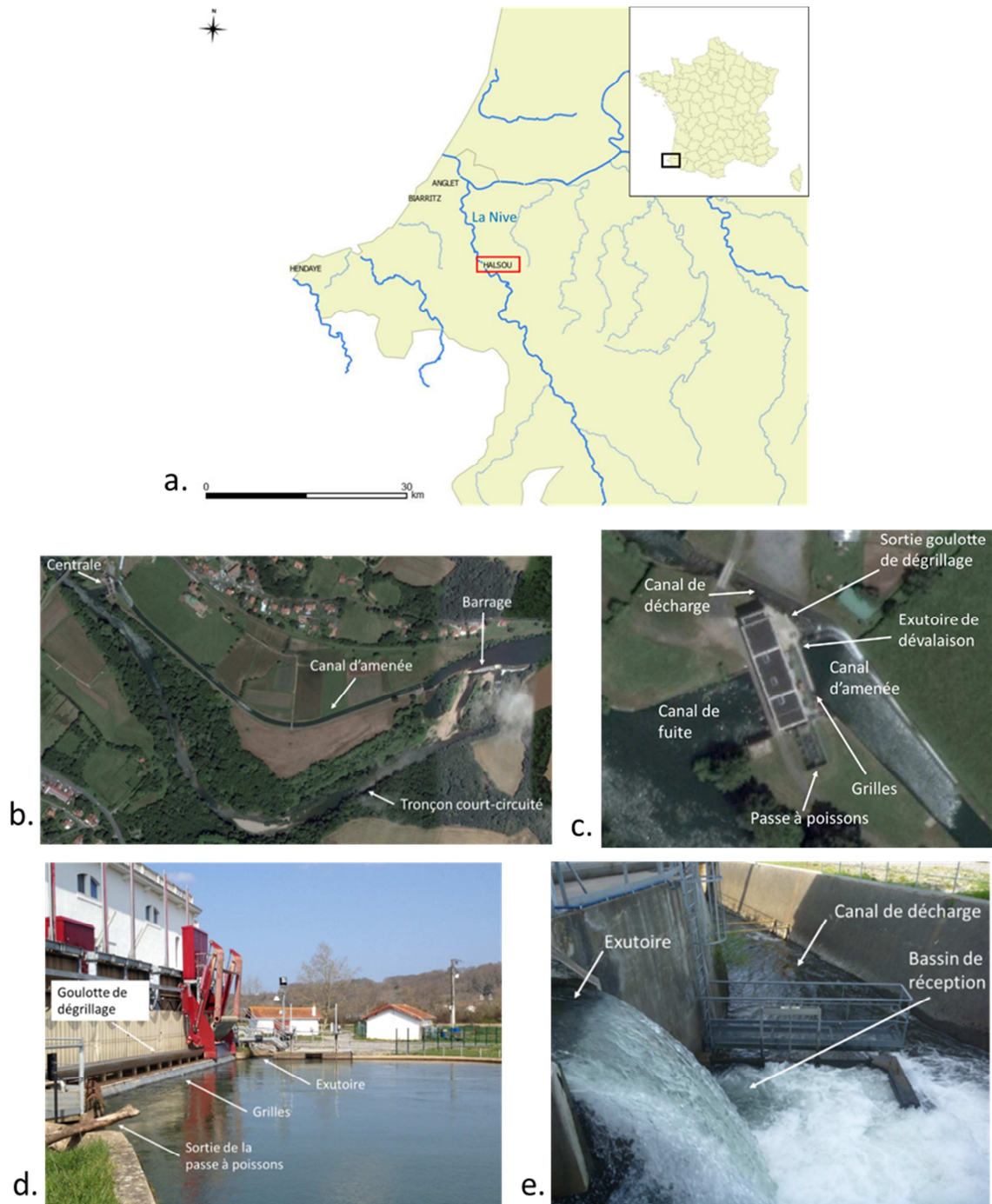
La centrale d’Halsou dérive les eaux de la Nive dans un canal d’aménée de 925 m de long et de 11 m de large (Figure 4b et c). La centrale est équipée de 3 turbines Francis horizontales : deux turbines turbinant jusqu’à  $8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et une turbine (la plus en rive droite) turbinant 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).



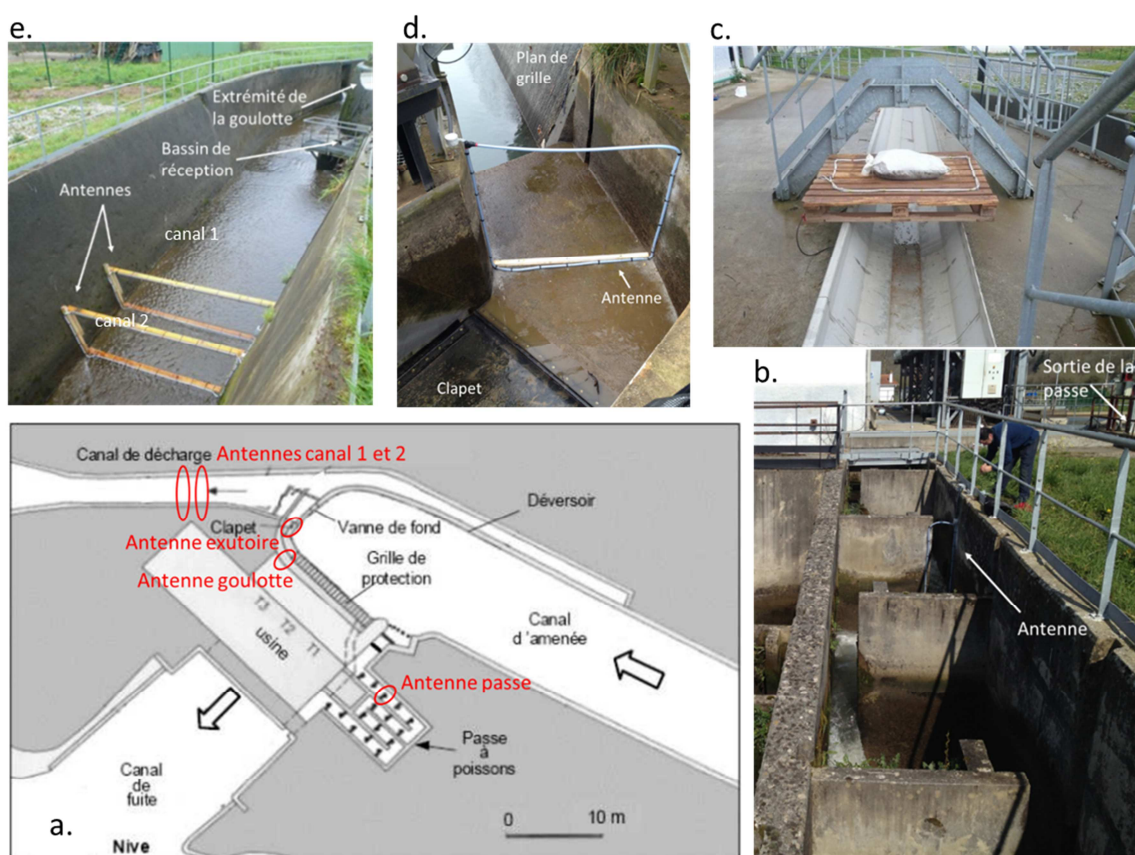
**Figure 4** : Vues d'ensembles et photos de l'aménagement d'Halsou : a. Localisation de la Nive en France, b. Vue aérienne de l'aménagement, c. vue aérienne de la centrale, d. photo de la centrale vue de l'amont et e. photo de l'aval de l'exutoire.

### 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 bastings 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.

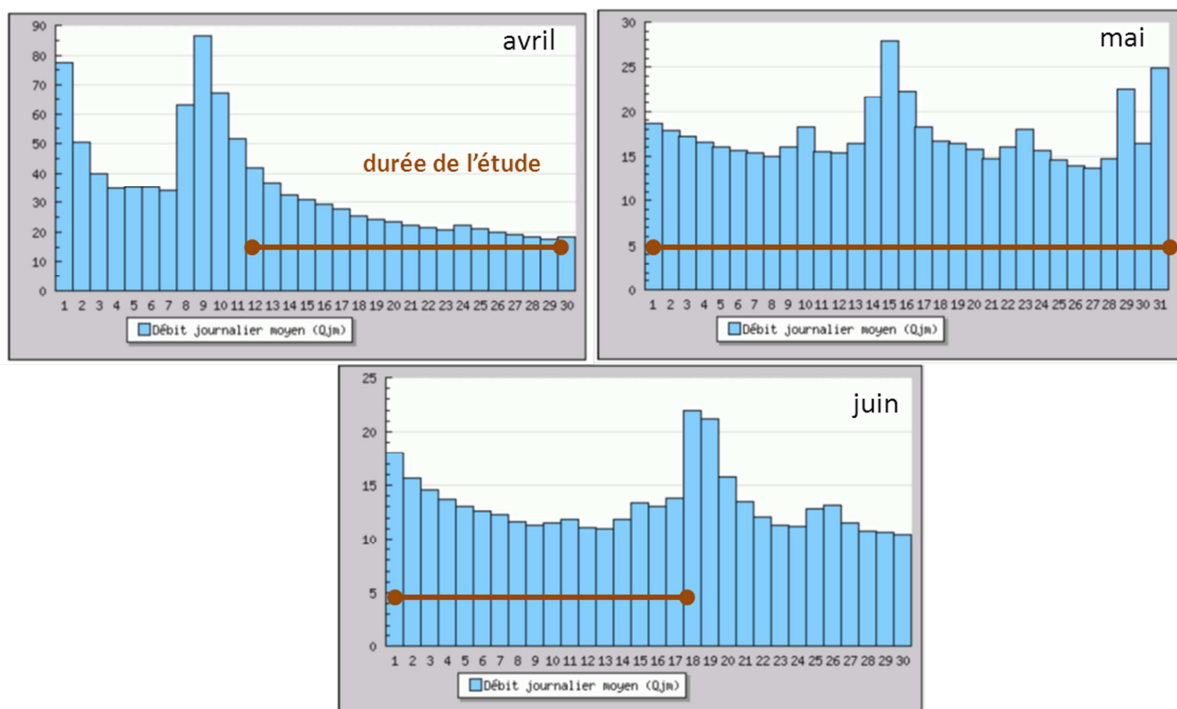
Au total, 338 poissons ont été relâchés à Halsou en 6 lots entre le 12 et le 13 avril 2016 entre 18h et 23h (Tableau 3) à 92 m de l'usine. La taille moyenne des individus lâchés est de 185.4 mm (min - max : 137 - 213 mm) et varie peu entre les lots (ANOVA,  $p < 0.05$ ) bien que le lot 1 ait des tailles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

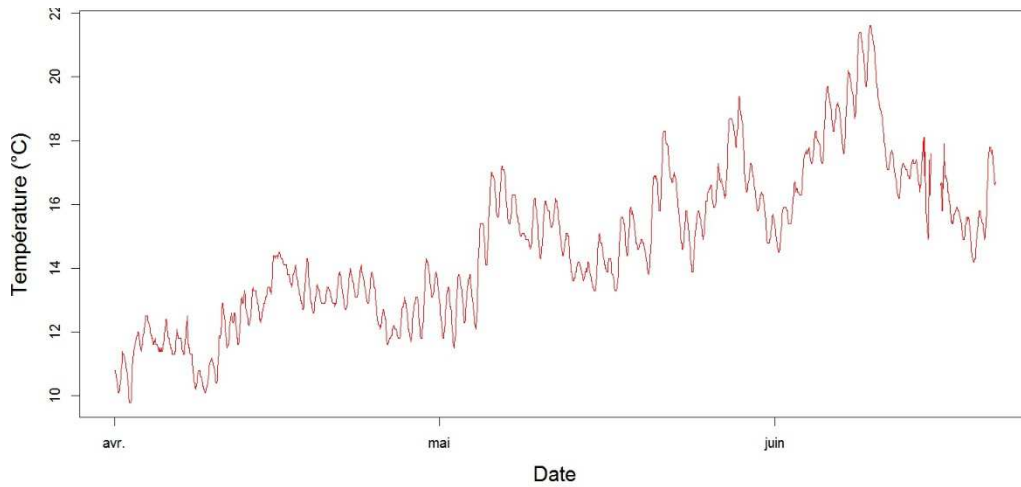
#### 2.1.4. Conditions environnementales et fonctionnement de la centrale pendant les tests

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 ( $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).



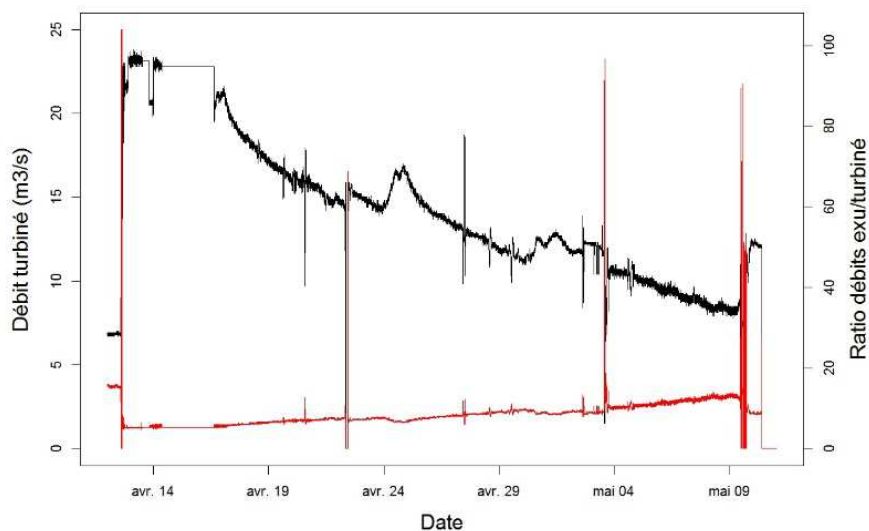
**Figure 7:** Débits moyens journaliers ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) de la Nive à Cambo-les-Bains en avril, mai et juin 2016 (source Banque Hydro).

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).

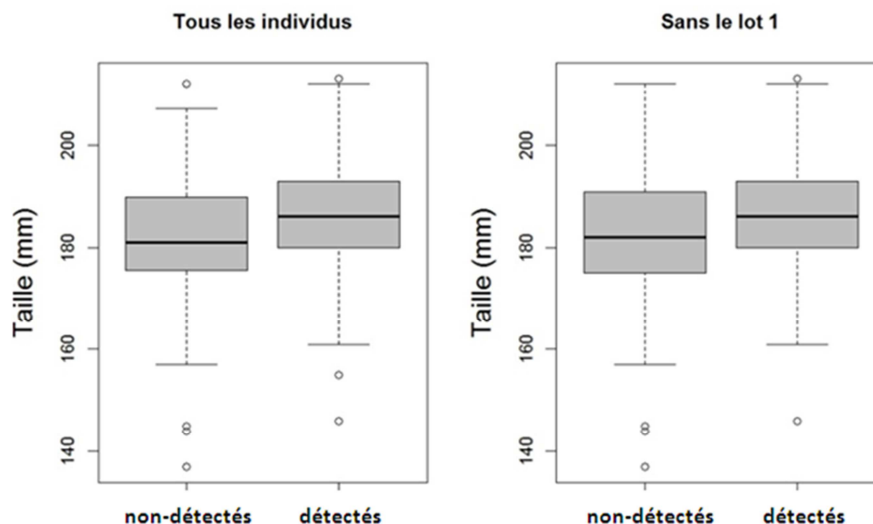
LOT	Total d'ind. deversés	Nombre d'individus non détectés	Nombre d'individus détectés dans				% d'individus détectés dans			
			exutoire	canal de décharge	goulotte de dégrillats	passé à poissons	exutoire	canal de décharge	goulotte de dégrillats	passé à poissons
HAL_L1	50	14	32	36	0	0	64	<b>72</b>	0	0
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).

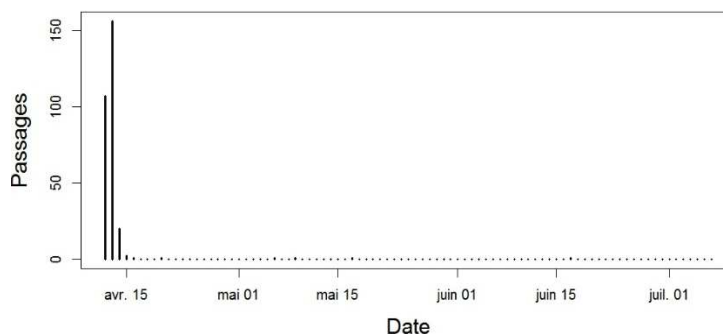
La Figure 10 présente la distribution des tailles pour les poissons ayant franchi la centrale par l’exutoire (individus détectés dans le canal de décharge) et pour ceux n’ayant pas franchi. On constate que la taille des poissons ayant franchi par l’exutoire est significativement supérieure à celle des 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’amenée 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’amenée, 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'amenée (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'amené dépasse le débit maximal turbiné).

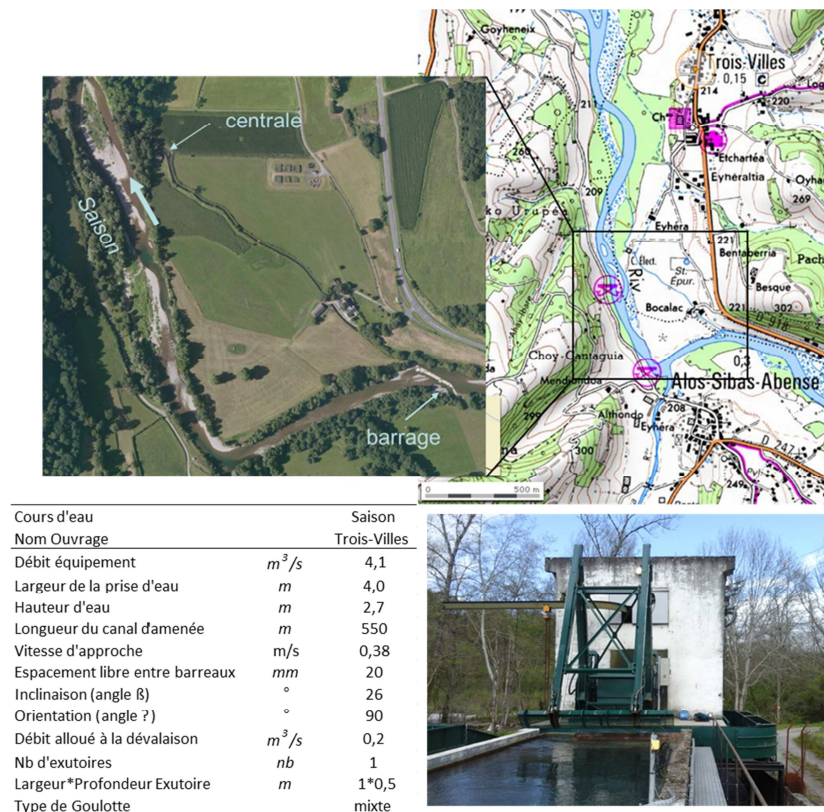
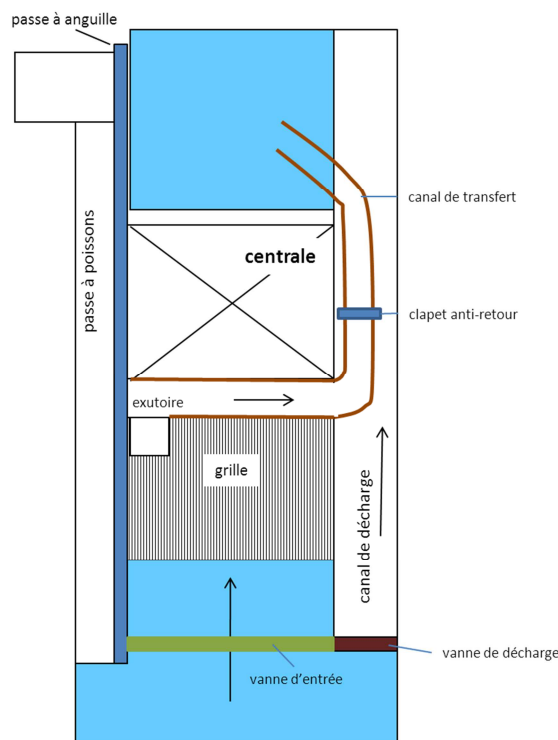


Figure 12 : Localisation et principales caractéristiques de la prise d'eau de Trois-Villes sur le Saison.



**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.

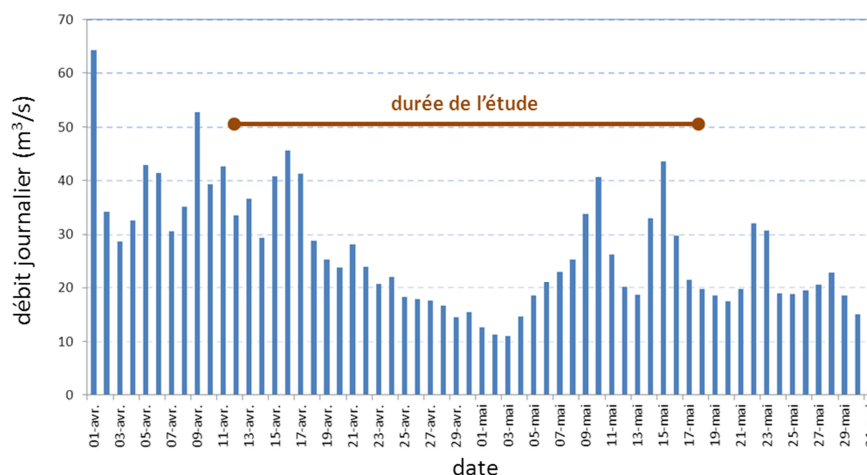
6 lots de 50 individus (pêchés au hasard dans le bac de stabulation) ont été lâchés entre 18h et minuit (Tableau 8) à environ 100 m en amont de la centrale. La taille moyenne des poissons testés sur ce site a été de 186 mm (min – max : 161 – 221mm) et a peu varié entre les lots (ANOVA,  $p > 0.05$ ).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

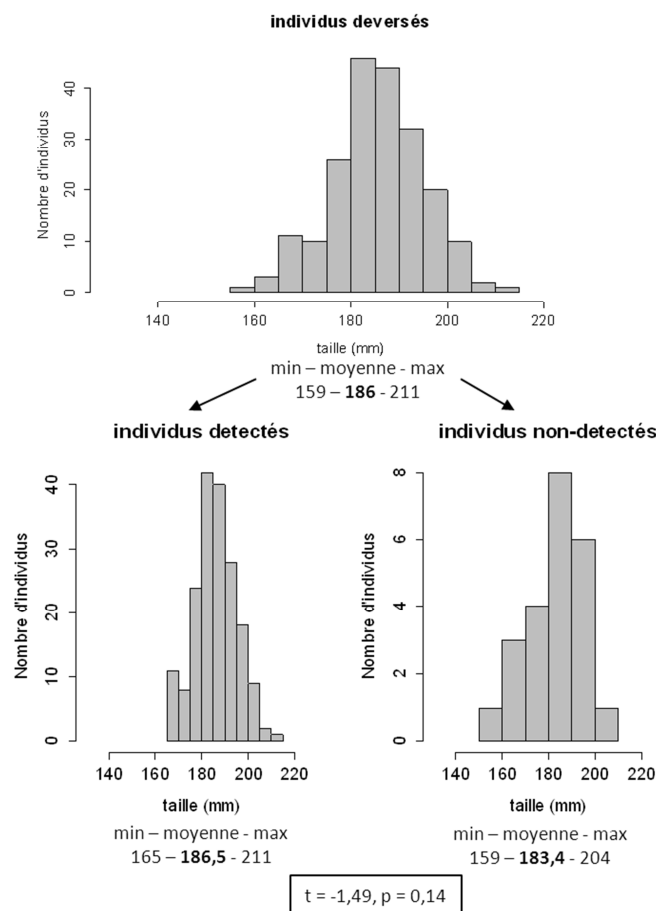
<b>Efficacité moyenne</b>	<b>87,5</b>	<b>1,0</b>	<b>88,5</b>
<b>± Ecart-type</b>	<b>7,5</b>	<b>1,5</b>	<b>7,6</b>

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.

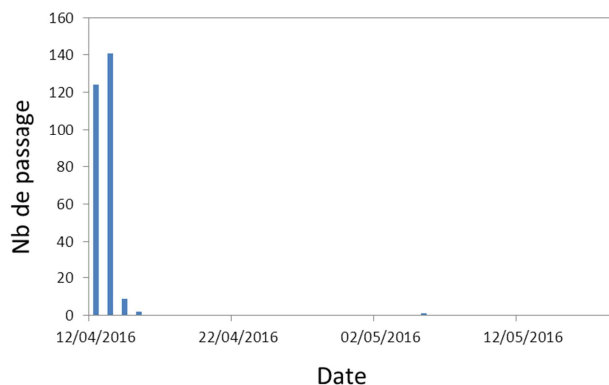


Figure 17 : Cinétique des passages sur le site de Trois-Villes.

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'amenée 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.

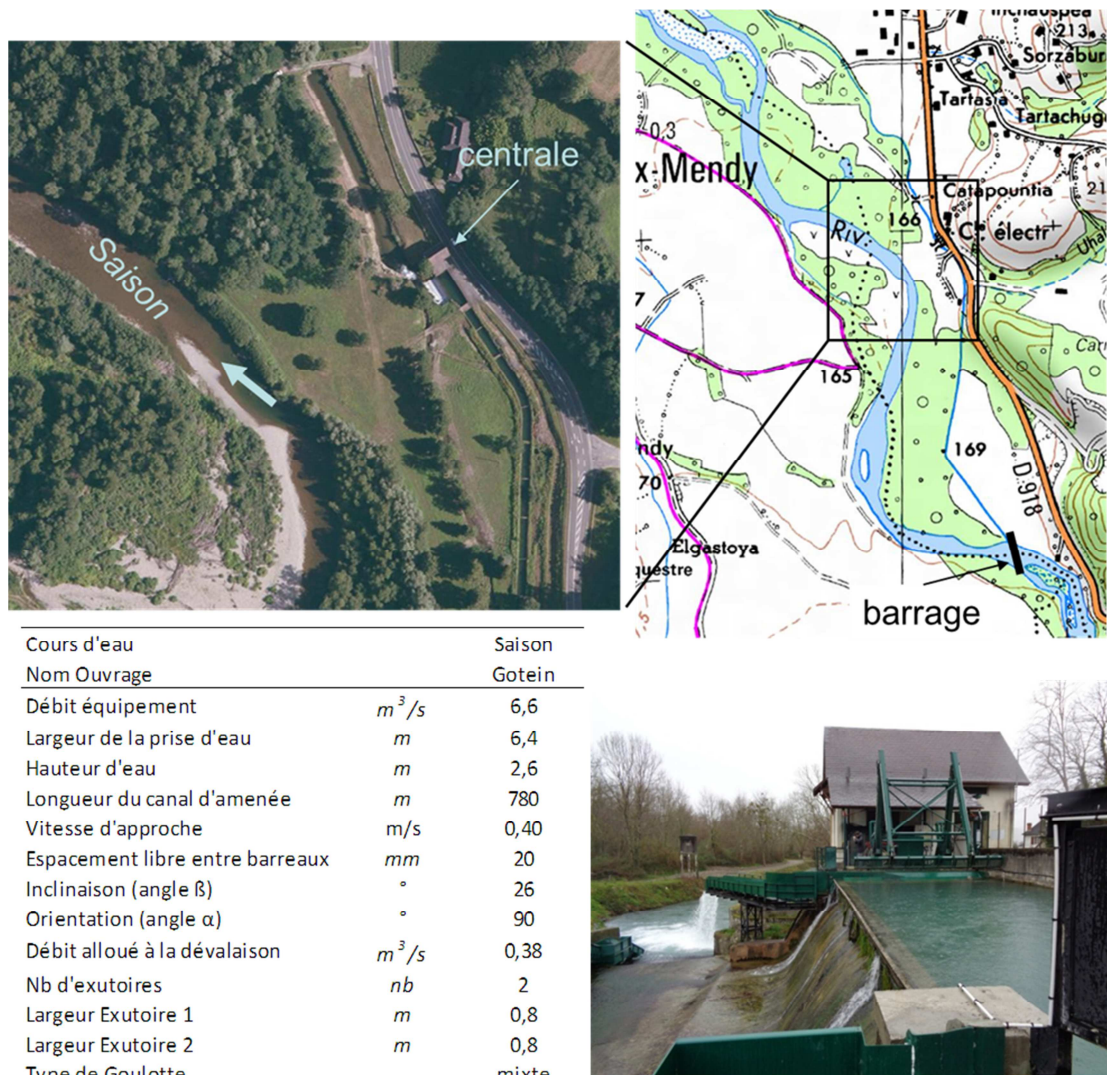
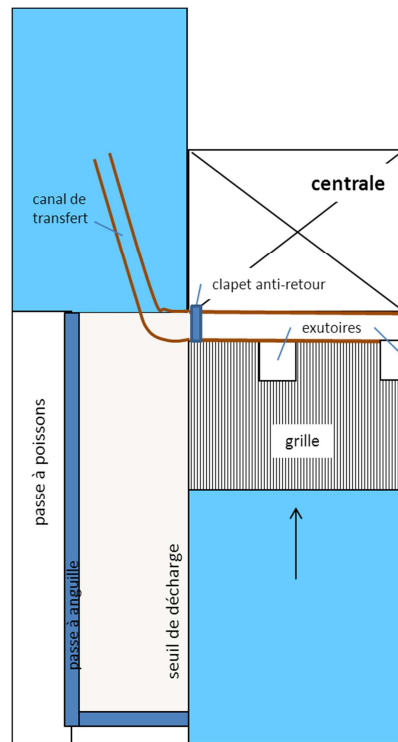


Figure 18 : Localisation et principales caractéristiques de l'aménagement de Gotein sur le Saison.



**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 %).

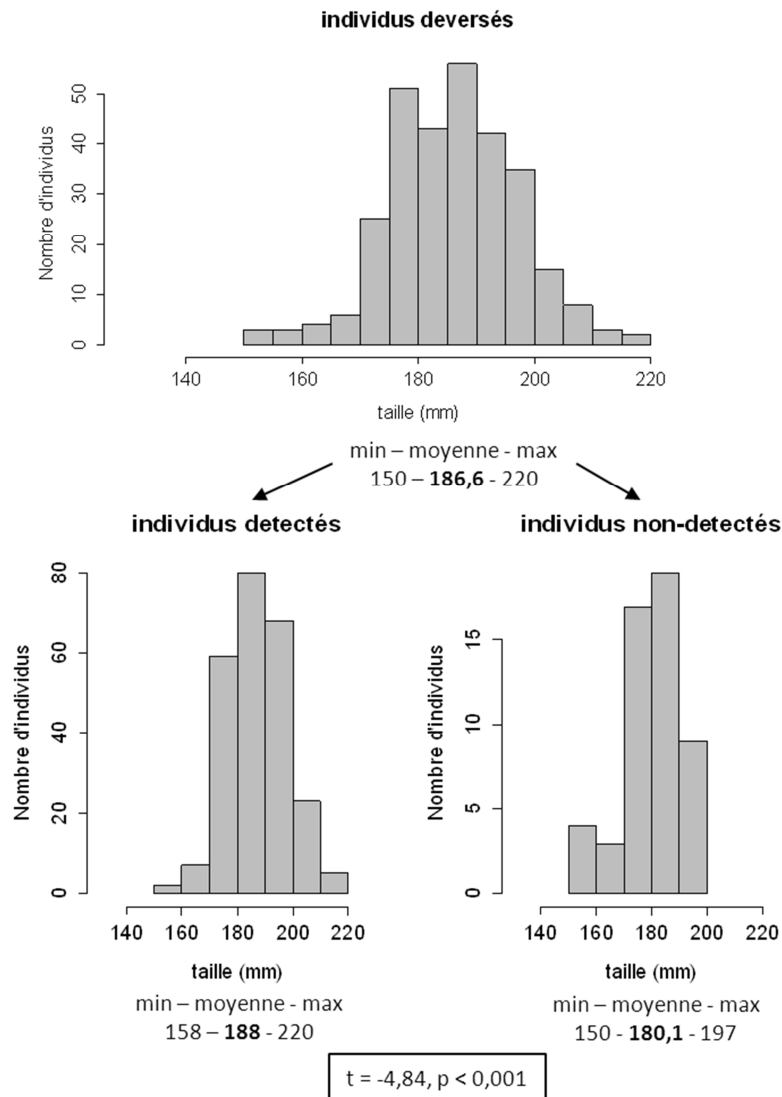
**Tableau 13** : Nombre et proportion des poissons détectés ou non dans les différentes voies de passage sur le site de Gotein (en gris : les lots lâchés le soir).

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 ?

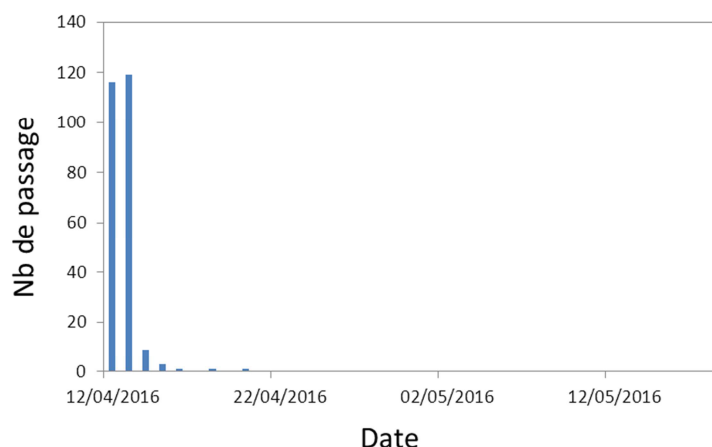
L'éventuelle différence de taille entre les individus ayant emprunté avec succès les exutoires/canal de transfert et ceux n'ayant pas été détectés (supposés passés au travers du plan de grille dans la turbine) a été testée avec un t-test de Student (les poissons ayant pris la passe à poissons ont été 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

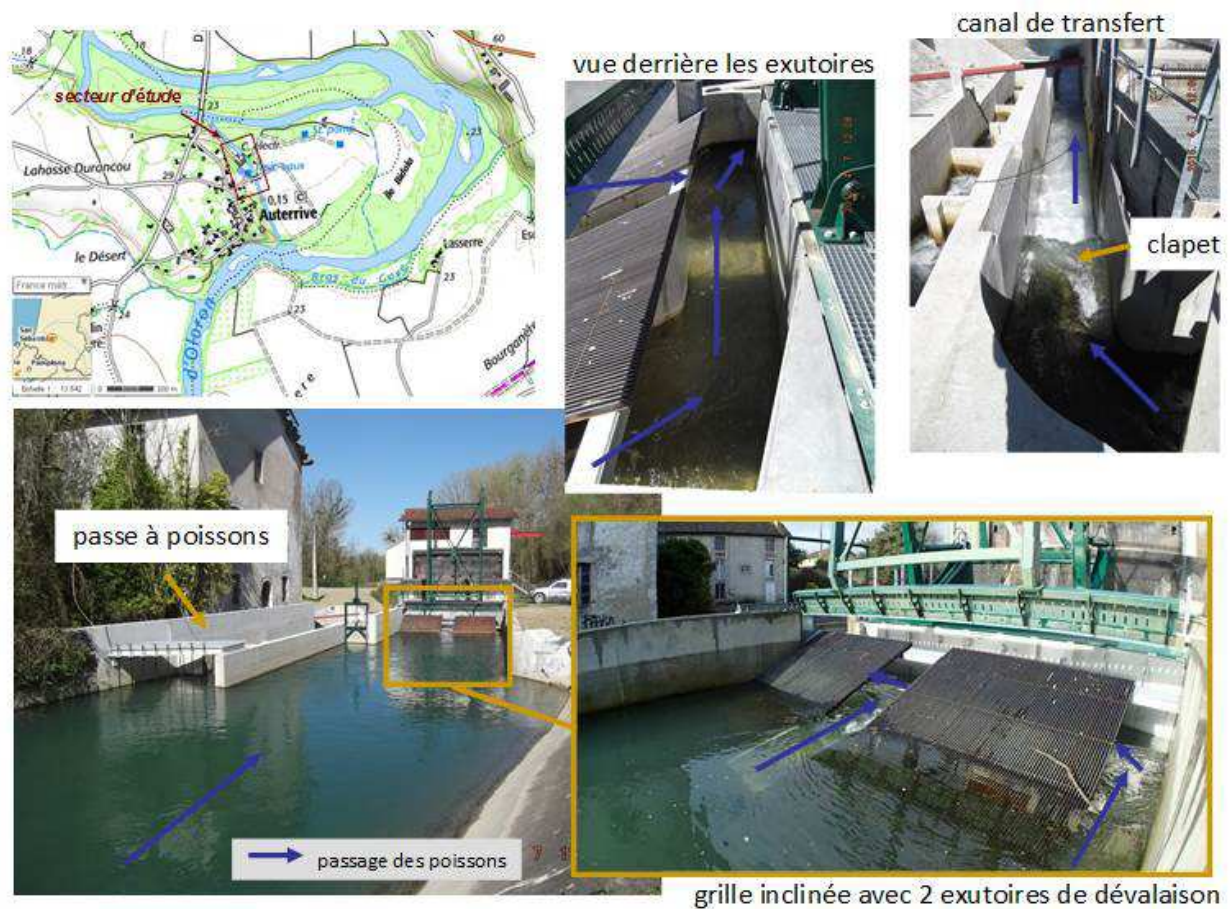
## 5. Rappel du test sur la centrale hydroélectrique d'Auterrive (2015)

### 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.

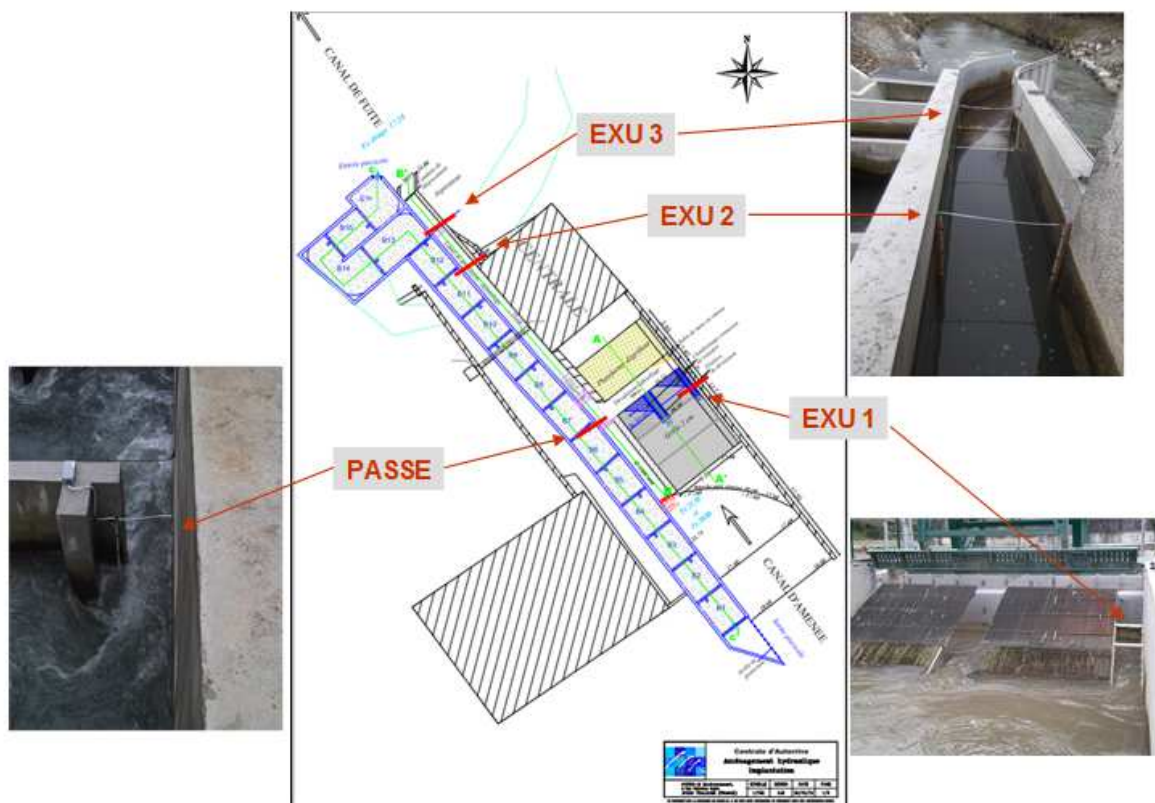


**Figure 23** : Localisation et aperçus du site d'étude, grille inclinée avec des exutoires et canal de transfert.

### 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 %).



#### 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'amenée (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 ?

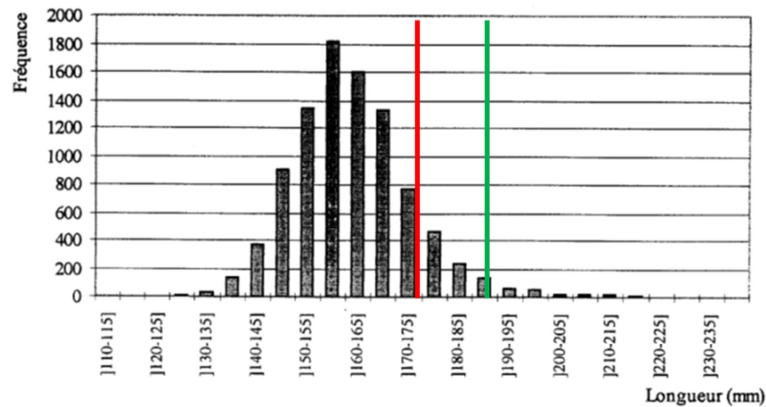
Sur tous les sites, les poissons franchissant par les exutoires et le canal de transfert sont de taille légèrement supérieure à ceux qui n'ont pas été détectés au franchissement et qu'on suppose passés au travers de la grille menant vers les turbines (Tableau 20). Mais cette différence a été statistiquement 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 radiotélémetrie. 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.