

# Evaluation du colmatage du substrat des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont

Année 2016

M. Coll ; G. Durbe ; S. Bosc ; O. Menchi



**M I G A D O**

*Migrateurs Garonne Dordogne*

## REMERCIEMENTS

---

Nous tenons à remercier tous les organismes et toutes les personnes qui ont participé financièrement ou techniquement aux différentes opérations :

- L'Union Européenne, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et la Fédération Nationale de la Pêche en France,

- L'ONEMA DIRSO Toulouse, et en particulier M. Francis GAYOU, pour son appui technique et son aide dans l'analyse des données recueillies

- Les Fédérations Départementales de Pêche de l'Ariège, des Hautes-Pyrénées et l'association MIGRADOUR pour leur participation à la collecte des données de terrain sur les secteurs de référence

### Equipes de travail

Coordination, rédaction et travail de terrain

- MIGADO :

Chargé de missions : Stéphane BOSC

Techniciens : Marie COLL, Olivier MENCHI, Alexandre NARS

Secrétariat édition : Marie Pierre CAPRINI

- Fédération de Pêche de la Haute Garonne :

Directeur : Olivier PLASSERAUD

Chargé de missions : Gaël DURBE

## RESUME

---

Suite à la crue centennale de 2013, l'Association MIGADO et la Fédération de Pêche de la Haute Garonne tentent d'évaluer la qualité du substrat des frayères potentielles et actives de salmonidés sur le bassin versant de la Garonne amont. Pour ce faire, un protocole d'évaluation du degré de colmatage interstitiel des frayères est développé à partir de mesures de conductivité hydraulique.

Ce protocole a été ponctuellement appliqué sur des stations de référence définies à dire d'expert comme présentant des zones de reproduction fonctionnelles. En parallèle, des mesures ont été réalisées en début puis en fin de période d'incubation des œufs pour chaque année de suivi afin de caractériser l'évolution du colmatage pendant la période de reproduction, mais également entre les années depuis la crue de 2013. Ce suivi concerne la Garonne amont (du Plan d'Arem jusqu'à sa confluence avec la Neste) et la Pique entre sa confluence avec la Neste d'Oô et celle avec la Garonne, secteurs perturbés par les ouvrages hydroélectriques.

Cette étude comporte une analyse globale des valeurs de référence, anciennes et récentes, ainsi qu'un bilan des résultats obtenus à l'issue de trois années de suivi sur la Garonne et la Pique.

Les analyses ont tout d'abord montré la cohérence de l'ensemble des données de référence recueillies jusqu'alors, et n'ont pas remis en cause l'utilisation de la proportion d'infiltration comme indicateur qualitatif de fonctionnalité d'un habitat de reproduction.

Les relevés réguliers réalisés sur la Garonne ont mis en évidence une tendance à la dégradation de la qualité des habitats de reproduction sur ce cours d'eau depuis 2015. En revanche, ce constat est moins net sur la Pique où seulement une station (localisée dans les gorges court-circuitées en aval du barrage de Luret) présente une diminution significative de la perméabilité du substrat entre 2015 et 2016.

Les résultats ont également montré des variations de fonctionnalité pendant la période d'incubation des œufs selon les stations considérées et davantage marquées sur la Garonne (notamment une diminution de la fonctionnalité en aval du Plan d'Arem) que sur la Pique. La perméabilité du substrat quant à elle tend globalement à diminuer pendant l'hiver, traduisant certainement une augmentation de la quantité de particules fines dans les frayères, puis se restaure totalement ou partiellement à l'occasion des crues de printemps.

## SOMMAIRE

---

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b><i>i</i></b>
<b>RESUME.....</b>	<b><i>ii</i></b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b><i>iii</i></b>
<b>Liste des illustrations.....</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte général.....	1
1.2 Objectifs de l'étude.....	1
1.3 Secteurs d'étude.....	2
<b>2 MATERIEL ET METHODE.....</b>	<b>3</b>
2.1 Protocole d'évaluation du colmatage des zones potentielles de frayères.....	<b>3</b>
2.1.1 Matériel utilisé.....	3
2.1.2 Mise en œuvre.....	4
2.1.2.1 Localisation de la zone potentielle de frayère.....	4
2.1.2.2 Echantillonnage.....	5
2.1.2.3 Mesures de conductivité hydraulique.....	6
2.1.3 Calcul de la conductivité hydraulique et de la proportion d'infiltration.....	8
2.2 Axe 1 : Panel de stations de référence.....	<b>9</b>
2.2.1 Cours d'eau concernés et localisation des stations.....	9
2.2.2 Echantillonnage.....	10
2.2.3 Traitement des données de référence.....	10
2.3 Axe 2 : Suivi pluriannuel post-crue de 2013.....	<b>11</b>
2.3.1.1 Cours d'eau concernés et localisation des stations.....	11
2.3.1.2 Echantillonnage et contexte hydrologique des campagnes de terrain.....	12
2.3.1.3 Traitement des données.....	14
2.3.1.3.1 Analyse de la variabilité spatiale.....	15
2.3.1.3.2 Analyse de la variabilité interannuelle.....	15
2.3.1.3.3 Analyse de la variabilité pendant la période d'incubation.....	15
<b>3 Résultats.....</b>	<b>16</b>
3.1 Axe 1 : Panel de stations de référence.....	<b>16</b>
3.2 Axe 2 : Suivi pluriannuel post-crue de 2013.....	<b>18</b>
3.2.1 Cas de la Garonne.....	18
3.2.1.1 Proportions d'infiltration.....	18
3.2.1.2 Conductivité hydraulique.....	20
3.2.2 Cas de la Pique.....	22
3.2.2.1 Proportions d'infiltration.....	22
3.2.2.2 Conductivité hydraulique.....	24
<b>4 Bilan et perspectives.....</b>	<b>27</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>29</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>31</b>

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

### **FIGURES**

Figure 1 : (A) Matériel utilisé et (B) dimensions du mini-piézomètre ( <i>Datry, 2011</i> ) .....	3
Figure 2 : Schéma de localisation et de structure d'une frayère de salmonidés ( <i>source : Dupont E. in Motte G., 2005</i> ).....	4
Figure 3 : Exemple de dispositions des points de mesure sur une zone d'échantillonnage.....	6
Figure 4 : Schéma récapitulatif du dispositif expérimental et des mesures réalisées pour chaque point d'échantillonnage.....	8
Figure 5 : Localisation des stations de référence.....	9
Figure 6 : Localisation des stations de suivi du colmatage des frayères à salmonidés sur la Garonne et la Pique.....	12
Figure 7 : Evolution des débits journaliers moyens en Garonne, de janvier 2014 à décembre 2016, mesurés à Saint-Béat (31) ( <i>source : banque HYDRO</i> ).....	14
Figure 8 : Proportions d'infiltration calculées pour les stations de référence.....	16
Figure 9 : Conductivité hydraulique (K) des différentes stations de référence .....	17
Figure 10 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2015 à 2016 sur la Garonne.....	19
Figure 11 : Evolution des proportions d'infiltration entre novembre 2015, février 2016 et novembre 2016 sur la Garonne.....	19
Figure 12 : Conductivité hydraulique (K) mesurée en début de période de reproduction sur la Garonne de 2015 à 2016.....	21
Figure 13 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) pendant l'hiver 2015-2016 sur les différentes stations de suivi en Garonne.....	22
Figure 14 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2014 à 2016 sur la Pique.....	23
Figure 15 : Evolution des proportions d'infiltration entre novembre 2014 et novembre 2016 sur la Pique.....	24
Figure 16 : Conductivité hydraulique (K) mesurée en début de période de reproduction sur la Pique de 2014 à 2016.....	25
Figure 17 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) pendant les hivers 2014-2015 et 2015-2016 sur les différentes stations de suivi sur la Pique .....	26

### **TABLEAUX :**

Tableau 1 : Synthèse bibliographique des caractéristiques des habitats de reproduction du saumon atlantique ( <i>Salmo salar</i> ) et de la truite fario ( <i>Salmo trutta</i> ).....	5
Tableau 2 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989).....	7
Tableau 3 : Chronique d'échantillonnage des stations de référence .....	10
Tableau 4 : Chronique d'échantillonnage des stations du réseau de suivi Garonne-Pique de 2014 à 2016.....	13
Tableau 5 : Paramètres descriptifs de la conductivité hydraulique (cm/h) des stations de référence ..	18

### **ANNEXES :**

Annexe 1 : Exemple de fiche terrain pour les relevés de conductivité hydraulique .....	32
Annexe 2 : Rappel des principes fondamentaux autour des tests d'hypothèses.....	33
Annexe 3 : Résultats du test de comparaisons deux à deux (Dunn) des conductivités hydrauliques moyennes des stations de référence .....	34
Annexe 4 : Résultats du test de comparaison des stations deux à deux (Dunn) des conductivités hydrauliques moyennes mesurées en novembre 2016 sur la Garonne .....	35
Annexe 5 : Résultats du test de comparaison des stations deux à deux (Dunn) des conductivités hydrauliques moyennes mesurées en novembre 2016 sur la Pique .....	36
Annexe 6 : Evolution de la conductivité hydraulique (K, cm/h) et de la proportion d'infiltration, de 2014 à 2016 sur les différentes stations de suivi en Garonne .....	37
Annexe 7 : Evolution de la conductivité hydraulique (K, cm/h) et de la proportion d'infiltration de 2014 à 2016 sur les différentes stations de suivi sur la Pique .....	38
Annexe 8 : Tableau récapitulatif des paramètres descriptifs (moyennes, écart-types et proportion d'infiltration) calculés pour chaque station à l'occasion de chaque session de mesure sur la durée du suivi.....	39

# 1 INTRODUCTION

---

## 1.1 Contexte général

Le colmatage minéral correspond au phénomène naturel de dépôt et d'infiltration de sédiments fins au sein du lit des cours d'eau conduisant au comblement des interstices du substrat minéral et à l'altération de ses fonctions (Gayraud et al., 2002). Ce processus peut toutefois être amplifié par diverses activités anthropiques sources de déséquilibres entre les processus naturels d'apport et de transport des sédiments fins (Gayraud et al., 2002, Wood & Armitage, 1997), comme c'est le cas à l'aval d'ouvrages hydroélectriques par exemple. Le colmatage peut impacter potentiellement toutes les espèces qui dépendent du substrat minéral pour la réalisation de tout ou partie de leur cycle biologique, notamment les espèces piscicoles lithophiles telles que le saumon atlantique (*Salmo salar*, Linnaeus 1758) et la truite fario (*Salmo trutta*, Linnaeus 1758).

La problématique du colmatage interstitiel des cours d'eau préoccupe la communauté scientifique depuis plusieurs années déjà. En 2009, l'ONEMA déploie le protocole CARHYCE chargé de caractériser l'hydromorphologie d'un cours d'eau, en application de la Directive Cadre sur l'Eau. Bien que ce premier protocole comprenne une partie d'évaluation du colmatage, l'ONEMA, en collaboration avec l'IRSTEA, développe en 2010 un nouveau protocole axé exclusivement sur le colmatage interstitiel des cours d'eau (Datry, 2011). Ce protocole vise à évaluer le colmatage d'un cours d'eau en utilisant des mesures de conductivité hydraulique et tend à être de plus en plus appliqué à l'échelle du territoire français.

Suite à la crue centennale de juin 2013 ayant touché le Sud-Ouest et les Pyrénées, la Fédération de Pêche de la Haute-Garonne et l'Association MIGADO souhaitent mettre en place un programme de suivi du colmatage du substrat des frayères de saumons atlantiques et de truites fario sur le bassin versant de la Garonne amont. L'étude de la fonctionnalité des substrats constituant les frayères potentielles et actives s'est basée sur l'application des outils et des fondements du protocole « Datry ».

Cette étude fait suite au premier rapport édité en 2015 qui évoquait la potentielle applicabilité de ce type de protocole au cas particulier des frayères à salmonidés ainsi que sa capacité à discriminer les zones potentielles de frayères selon leur degré de perturbation hydromorphologique (Coll et al., 2015).

## 1.2 Objectifs de l'étude

Depuis les premiers essais d'application des mesures de conductivité hydraulique au cas des frayères à salmonidés réalisés de 2013 à 2015, le programme s'est enrichi de nouvelles stations de référence et de suivi notamment sur la Garonne et la Pique afin de :

**(1) Confronter les nouvelles données de références à celles recueillies jusqu'alors pour vérifier la validité des conclusions émises en 2015**

**(2) Caractériser l'évolution interannuelle du colmatage du substrat des frayères à salmonidés depuis la crue de 2013 sur les stations de suivi**

**(3) Etudier les potentielles variations de colmatage pendant la période d'incubation des œufs sur les stations de suivi**

### 1.3 Secteurs d'étude

Dans le cadre du programme de restauration des poissons migrateurs du Bassin de la Garonne et de l'action de suivi de la reproduction naturelle des grands salmonidés, les mesures de conductivité hydraulique ont été étendues sur l'ensemble des cours d'eau du bassin susceptibles d'être colonisés par les saumons, et dans lesquels des populations de truites sont présentes.

Les données de références sont issues de mesures ponctuelles réalisées sur des cours d'eau du massif pyrénéen :

- la Neste d'Oô, la Neste d'Oueil, le Ger, le Job et la Pique amont dans le département de la Haute-Garonne
- la Neste du Louron dans le département des Hautes-Pyrénées
- le Lourdios dans les Pyrénées Atlantiques

Le suivi pluriannuel du colmatage des frayères concerne :

- La Garonne amont : depuis le barrage du plan d'Arem jusqu'à la confluence avec la Neste d'Aure
- La Pique : entre la confluence avec la Neste d'Oô et celle avec la Garonne

Les secteurs concernés par le suivi du colmatage sont largement impactés par les ouvrages hydroélectriques. Le fonctionnement de la chaîne hydroélectrique espagnole du Val d'Aran et les éclusées produites par les installations associées au Plan d'Arem (usines de Fos et Arlos) engendrent des perturbations hydrologiques qualifiées de très sévères (Courret et *al.*, 2008) en Garonne amont. La Pique quant à elle, est sous l'influence d'une complexe chaîne hydroélectrique fonctionnant également par éclusées (centrales du Portillon, de la Pique supérieure, de la Pique inférieure et du lac d'Oô).

## 2 MATERIEL ET METHODE

### 2.1 Protocole d'évaluation du colmatage des zones potentielles de frayères

Les mesures réalisées dans le cadre des stations de référence et du suivi pluriannuel post-cruie ont consisté en l'application d'un protocole développé à partir de la méthode de conductivité hydraulique (Datry, 2011), adaptée au cas des frayères de salmonidés.

Ce protocole peut être appliqué par une équipe de trois personnes, compte tenu de la quantité de matériel à transporter et du nombre de tâches à réaliser à chaque point de mesure.

#### 2.1.1 Matériel utilisé

Chaque équipe de terrain doit disposer de :

- |   |                     |                   |
|---|---------------------|-------------------|
| - 1 mini-piézomètre                       | - Craies            | - 1 béccher d'1 L |
| - 1 tige métallique<br>peinte en noir mat | - Chiffons          | - 1 chronomètre   |
| - 1 tube PVC<br>gradué                    | - 2 têtes de frappe | - 1 décamètre     |
|   | - 1 masse           | - Téflon          |
|   | - 1 entonnoir d'1 L |                   |

La Figure 1 ci-dessous présente le matériel nécessaire pour l'application du protocole. Notons que les dimensions du mini-piézomètre (Figure 1.B) utilisé dans le cadre de cette étude correspondent à celles suggérées par Datry (2011) afin de rendre possible l'application de la formule de calcul de la conductivité hydraulique.

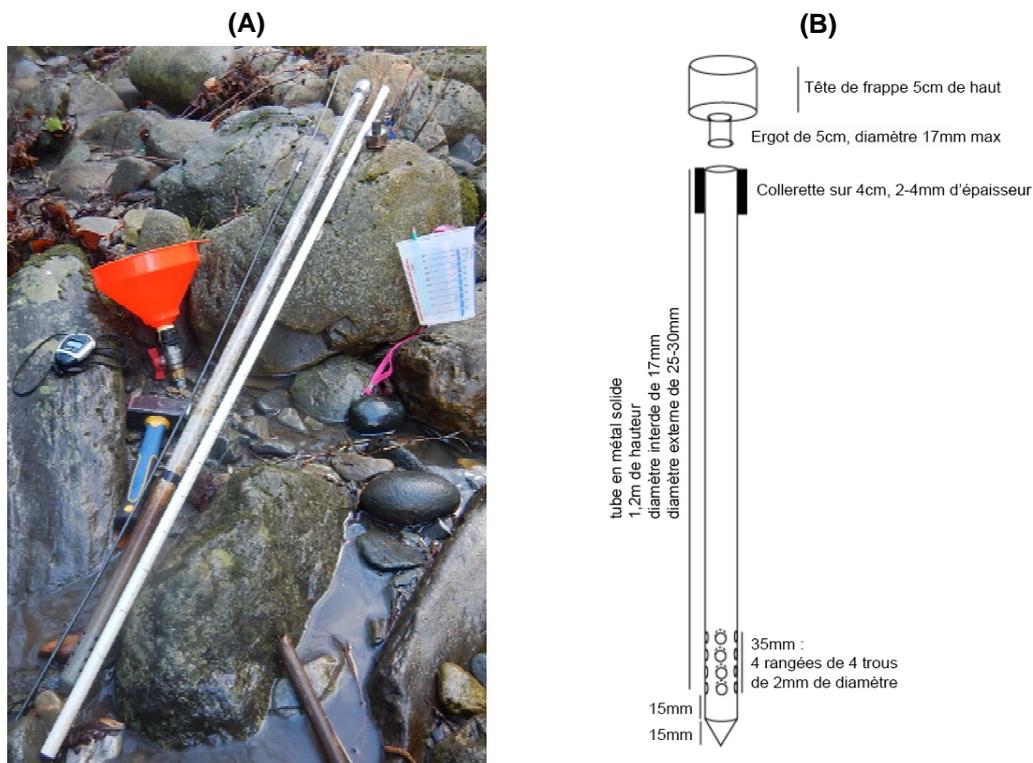
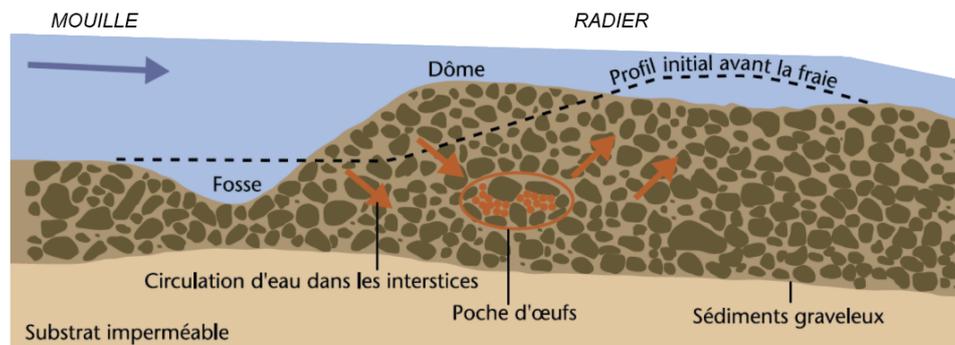


Figure 1 : (A) Matériel utilisé et (B) dimensions du mini-piézomètre (Datry, 2011)

## 2.1.2 Mise en œuvre

### 2.1.2.1 Localisation de la zone potentielle de frayère

La mise en œuvre du protocole nécessite au préalable une prospection à pied de la station afin de localiser visuellement les zones de frayères potentielles. Ces frayères potentielles consistent généralement en des bancs de graviers situés dans des zones de transitions entre mouilles et radiers (Figure 2), où la vitesse de courant augmente avec la diminution de la hauteur d'eau (Bardonnnet et Baglinière, 2000 ; Crips, 1996 ; Gaudemar et *al.*, 2000 ; Gibson, 1993).



**Figure 2 : Schéma de localisation et de structure d'une frayère de salmonidés  
(source : Dupont E. in Motte G., 2005)**

Cette configuration présente ainsi les caractéristiques hydromorphologiques (granulométrie, vitesse de courant et hauteur d'eau) conformes aux exigences des salmonidés pour le frai, illustrées dans le Tableau 1.

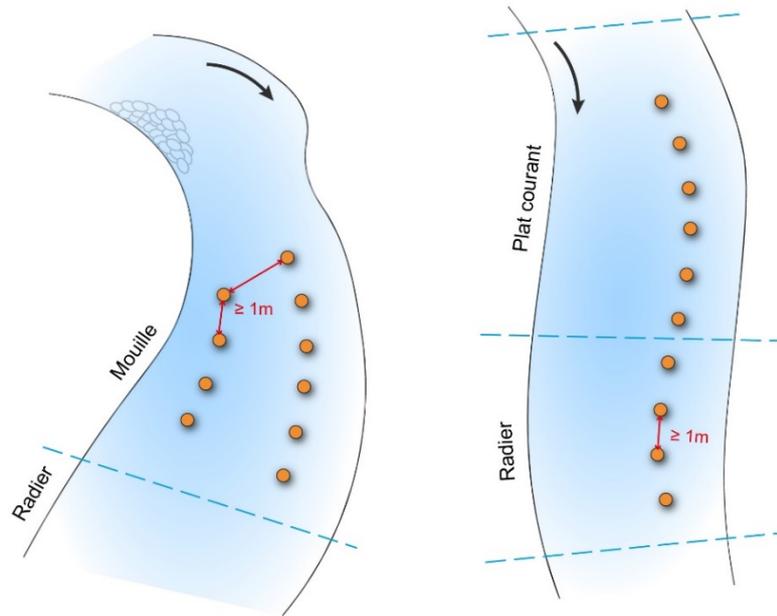
Espèce	Variable environnementale	Type de mesure	Valeurs	Auteurs
Saumon atlantique ( <i>Salmo salar</i> )		Minimum	15-20	Crisp et Carling, 1989
		Rang	31-46	Jones (1959) dans Gibson, 1993
	Vitesse (cm/s)	Moyenne	35-80	Moir et al., 1998
			35-65	Louhi et al., 2008
		40	Heggberget (1991) dans Armstrong, 2003	
		50	Gueguen et Prouzet, 1994	
	Hauteur d'eau (cm)	Rang	15-40	Moir et al., 1998
		Moyenne	20-50 38 50	Louhi et al., 2008 Beland et al., 1982 Heggberget (1991) dans Armstrong, 2003
	Granulométrie (mm)	Rang	16-64	Louhi et al., 2008
		Moyenne	20,7	Moir et al., 1998
Profondeur d'enfouissement des œufs (cm)	Rang	15-30 15-25	Gueguen et Prouzet, 1994 Bardonnnet et Baglinière, 2000	
	% de fines	<1mm 0,5 – 2,2mm	<20% 10 – 15%	Crisp et Carling, 1989 Peterson, 1978
Truite fario ( <i>Salmo trutta</i> )	Vitesse (cm/s)	Rang	20-55 30-40 30-80	Louhi et al., 2008 Ottaway et al., 1981 Bruslé et Quignard, 2001
		Moyenne	10-40 39,4 46,7	Barlaup et al., 2008 Shirvell et Dungey, 1983 Witzel et MacCrimmon, 1983
	Hauteur d'eau (cm)	Rang	15-45 20-40	Louhi et al., 2008 Bruslé et Quignard, 2001
		Moyenne	10-50 31,7 25,5	Barlaup et al., 2008 Shirvell et Dungey, 1983 Witzel et MacCrimmon, 1983
	Granulométrie (mm)	Rang	16-64 2-20	Louhi et al., 2008 Bruslé et Quignard, 2001
		Moyenne	16-32 14 6,9	Barlaup et al., 2008 Shirvell et Dungey, 1983 Witzel et MacCrimmon, 1983
	Profondeur d'enfouissement des œufs	Rang	5-15 8-22	Barlaup et al., 2008 Chapmann, 1988
		Moyenne	2-23 14	Grost et al., 1991 Witzel et MacCrimmon, 1983
	% de fines	<1mm	8-12%	Crisp et Carling, 1989

**Tableau 1 : Synthèse bibliographique des caractéristiques des habitats de reproduction du saumon atlantique (*Salmo salar*) et de la truite fario (*Salmo trutta*)**

#### 2.1.2.2 Echantillonnage

Les zones de frayères potentielles recherchées doivent présenter une surface relativement importante pouvant être le support de 10 points de mesure de conductivité hydraulique tout en respectant un espacement minimal d'1 m entre chaque point.

La position des points sur la zone à échantillonner doit être adaptée à la configuration locale de la frayère potentielle afin que les mesures soient les plus représentatives possibles. Ainsi, les points peuvent être positionnés selon un transect ou plus, comme illustré dans la Figure 3.



**Figure 3 : Exemple de dispositions des points de mesure sur une zone d'échantillonnage**

### 2.1.2.3 Mesures de conductivité hydraulique

Pour chaque point de mesure :

- **Enfoncer le mini-piézomètre** préalablement muni d'une tête de frappe à 20 cm de profondeur dans le substrat à l'aide de la masse. Lorsque l'enfoncement du mini-piézomètre ne peut atteindre ou dépasse 20 cm, noter la valeur exacte sur la fiche de terrain. Lors de l'enfoncement, s'assurer que le tube reste le plus vertical possible afin d'éviter l'altération de la structure initiale du substrat et donc de biaiser la mesure.

#### **Remarques :**

Une marque peut être apposée sur le mini-piézomètre (à 20 cm à partir de la pointe du tube) à l'aide de ruban adhésif afin de faciliter la lecture de la profondeur d'enfoncement.

La profondeur de 20 cm a été retenue (contre 25 cm dans le protocole « Datry » initial) au regard des objectifs visés dans l'application de ces mesures au cas des frayères potentielles. En effet, s'agissant ici de mesurer la perméabilité du substrat minéral servant de support de ponte, une profondeur de 20 cm correspond davantage à une profondeur d'enfouissement moyenne des œufs. De plus, les observations de terrain au cours des premiers essais laissaient penser que pour certains cours d'eau étudiés, des profondeurs d'enfoncement supérieures étaient peu pertinentes (épaisseur matelas alluvial insuffisante).

- **Mesurer ou relever les paramètres suivants :**
  1.  **$h_{ext}$  : hauteur d'eau à l'extérieur du tube** (cm) à l'aide du tube PVC gradué.
  2.  **$h_{int}$  : hauteur d'eau à l'intérieur du tube** (cm) en insérant la tige métallique préalablement peinte ou enduite de craie dans le mini-piézomètre. Une fois la tige retirée, la hauteur d'eau à mesurer est matérialisée par la partie mouillée.
  3.  **$Dt$  : vitesse d'infiltration** (s). Placer l'entonnoir fermé à l'extrémité supérieure du mini-piézomètre. S'assurer de l'étanchéité de la jonction entre les deux éléments et ajouter du téflon le cas échéant. Prélever ensuite 1 L d'eau à l'aide du bécet et verser ce volume dans l'entonnoir. Ouvrir le robinet de l'entonnoir tout en

déclenchant le chronomètre. Lorsque le niveau d'eau atteint le fond de l'entonnoir, arrêter le chronomètre et noter le temps indiqué. S'il n'y a aucune infiltration après 2 minutes, noter « Pas d'infiltration ». Dans le cas où l'infiltration est visible mais très lente, arrêter la mesure après 5 minutes et l'indiquer dans la fiche terrain.

4. **La distance à la rive** (m) droite ou gauche selon le cas.
5. **La granulométrie (deux classes dominantes)** selon l'échelle suivante :

Classe granulométrie	Diamètre du second axe (mm)	Code
Rochers	>1024	R
Blocs	256-1024	B
Pierres Grossières	128-256	PG
Pierres Fines	64-128	PF
Cailloux Grossiers	32-64	CG
Cailloux Fins	16-32	CF
Graviers Grossiers	8-16	GG
Graviers Fins	2-8	GF
Sables Grossiers	0,5-2	SG
Sables Fins	0,0625-0,5	SF
Limons	0,0039-0,0625	L
Argiles	<0,0039	A

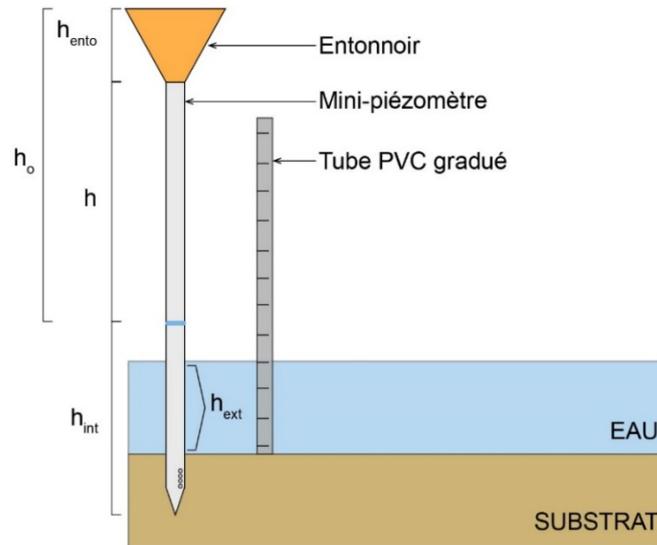
**Tableau 2 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989)**

6. **La vitesse de courant** (m/s) selon trois classes : <0,2 / 0,2-0,5 / >0,5
7. **Le faciès** (radier, plat courant, mouille) au point de mesure.

Un exemple de fiche de terrain est disponible en Annexe 1.

### 2.1.3 Calcul de la conductivité hydraulique et de la proportion d'infiltration

L'ensemble du dispositif expérimental ainsi que les différentes mesures réalisées sont schématisés dans la Figure 4 ci-dessous.



**Figure 4 : Schéma récapitulatif du dispositif expérimental et des mesures réalisées pour chaque point d'échantillonnage**

Soient :

- $h_{piézo}$ , la hauteur du mini-piézomètre
- $h_{ento}$ , la hauteur de l'entonnoir (ici 15cm)
- $D_{piézo}$ , le diamètre du mini-piézomètre (ici 1,7cm)
- $h$ , la hauteur d'air à l'intérieur du tube telle que :  $h = h_{piézo} - h_{int}$
- $h_o$ , la hauteur de la colonne d'air depuis l'entonnoir, telle que :  $h_o = h + h_{ento}$

A partir des données recueillies sur le terrain ( $h_{int}$ ,  $h_{ext}$  et  $Dt$ ), il est alors possible d'en déduire différents paramètres ( $h$  et  $h_o$ ) utiles au calcul de la conductivité hydraulique (notée  $K$ , en cm/h) selon la formule suivante :

$$K = \frac{(0,2501 * D_{piézo})}{Dt} * \ln\left(\frac{h_o}{h}\right)$$

Des valeurs de conductivité hydraulique élevées traduisent une meilleure perméabilité du substrat et donc un colmatage interstitiel des frayères moins important.

La proportion d'infiltration (notée  $P$ ), indicateur qualitatif de la fonctionnalité d'une frayère, est calculée à l'échelle d'une station selon la formule suivante :

$$P = 1 - \frac{\text{Nombre de points sans infiltration } (K = 0)}{\text{Nombre total de point}}$$

## 2.2 Axe 1 : Panel de stations de référence

### 2.2.1 Cours d'eau concernés et localisation des stations

Comme évoqué dans l'introduction, une étude préliminaire portant sur l'applicabilité de la méthode de conductivité hydraulique dans l'évaluation du degré de colmatage des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont a été réalisée (Coll *et al.*, 2015). Cette première étude a nécessité la réalisation de mesures de conductivité hydraulique sur des zones de frayères potentielles et actives localisées dans des cours d'eau ou tronçons définis à dire d'expert comme étant des « références fonctionnelles ». Ces mesures devaient notamment permettre de caractériser la conductivité hydraulique de tronçons connus comme présentant un bon recrutement des populations de truite fario ou de saumon atlantique. Ainsi, des mesures ont été réalisées sur la Neste d'Oô, la Neste d'Oueil (cours d'eau en gestion patrimoniale) et la Neste du Louron.

Depuis, le panel de stations de référence s'est enrichi de mesures réalisées sur le Ger, le Job, le Lourdios et la Pique amont. La localisation des différentes stations de référence est présentée dans la Figure 5.

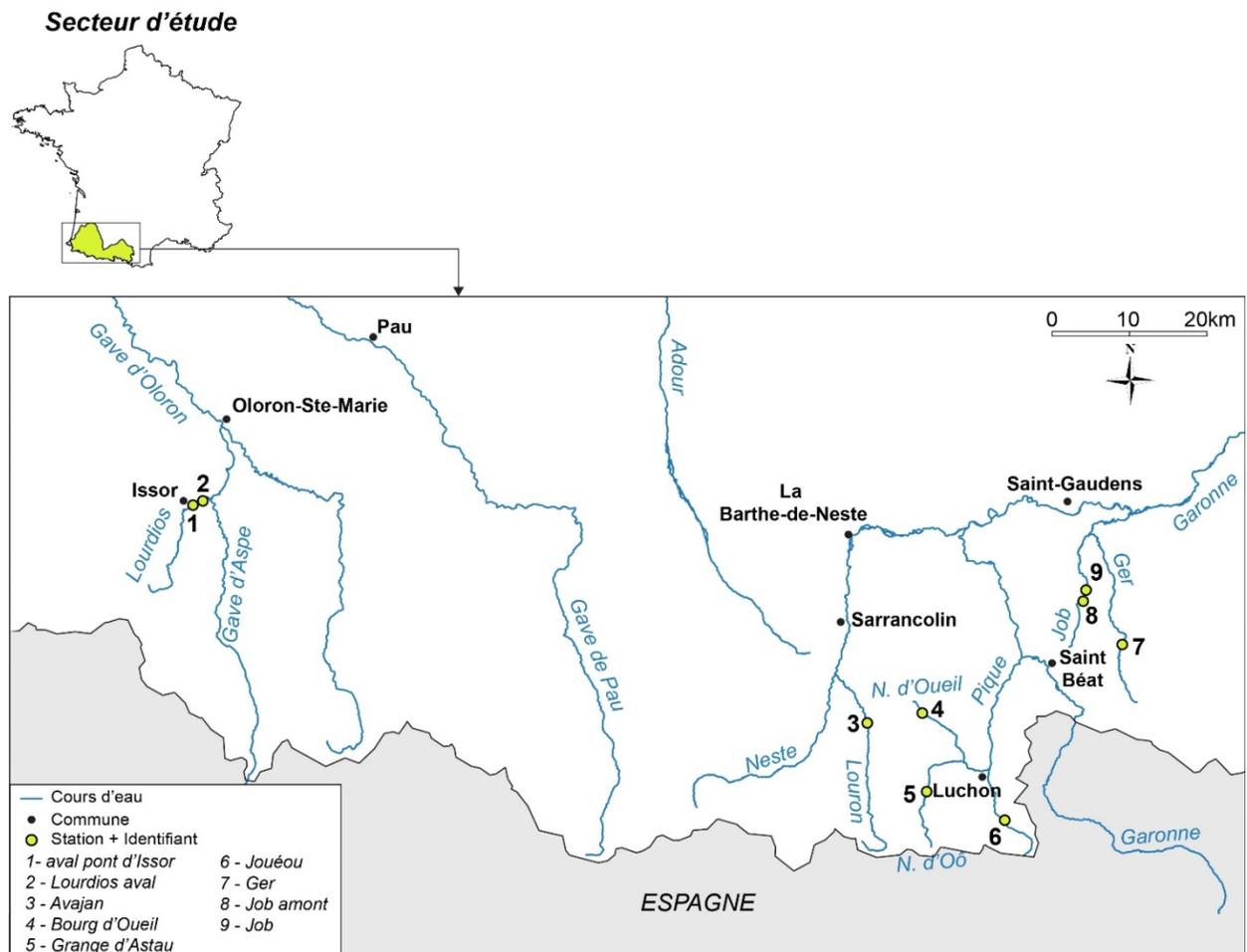


Figure 5 : Localisation des stations de référence

### 2.2.2 Echantillonnage

Les stations de référence ainsi que les périodes d'échantillonnage sont présentées dans le Tableau 3.

Les relevés de terrain ont majoritairement eu lieu en hiver, en parallèle des mesures de conductivité relatives au suivi en Garonne et Pique. Toutefois, quelques campagnes se sont tenues en été (juin 2015) sur le Ger et le Job, afin de disposer de mesures en secteur non perturbé par l'hydroélectricité sur une période où les matelas alluviaux sont théoriquement les plus restaurés suite aux crues de printemps.

L'implantation locale des stations s'est faite tant que possible sur des habitats potentiels de reproduction des salmonidés pouvant supporter une dizaine de mesures de conductivité hydraulique. Cependant, les secteurs de références non perturbés en Haute Garonne consistent en des cours d'eau relativement petits, présentant peu de pools sur lesquels dix mesures sont possibles. Ainsi, la plupart des données de référence pour une même station consiste en des cumuls de points réalisés sur des habitats de reproduction successifs.

Cours d'eau	Stations	Date d'échantillonnage	Nombre de points
Neste du Louron	Avajan	24/03/2014	9
Neste d'Oô	Grange d'Astau	26/01/2015	12
Neste d'Oueil	Bourg d'Oueil	26/01/2015	10
Job	Job amont	6/11/2015	11
	Job	18/06/2015	21
Ger	Ger	18/06/2015	25
Pique	Jouéou	11/02/2016	5
Lourdios	Aval pont d'Issor	21/12/2016	10
	Lourdios aval		10
<b>TOTAL = 113</b>			

**Tableau 3 : Chronique d'échantillonnage des stations de référence**

### 2.2.3 Traitement des données de référence

La conductivité hydraulique moyenne, l'écart-type (indicateur de dispersion des valeurs autour de la moyenne) et la proportion d'infiltration ont été calculés pour chaque station.

Une analyse graphique des proportions d'infiltration calculées à partir de l'ensemble des données de référence recueillies jusqu'alors est réalisée afin de vérifier la cohérence avec les observations faites en 2015.

L'analyse de la variabilité des valeurs de conductivité hydraulique entre les différentes stations de référence est réalisée à partir d'un test de comparaisons multiples de Kruskal-Wallis (fonction *kruskal.test* du package *stats* de R), dont le seuil de signification a été fixé à 5%. Ensuite, un test de Dunn (fonction *dunn.test* du package *dunn.test* de R) a été

réalisé afin de comparer deux à deux les stations de référence pour savoir lesquelles ont des conductivités hydrauliques significativement différentes.

## **2.3 Axe 2 : Suivi pluriannuel post-crue de 2013**

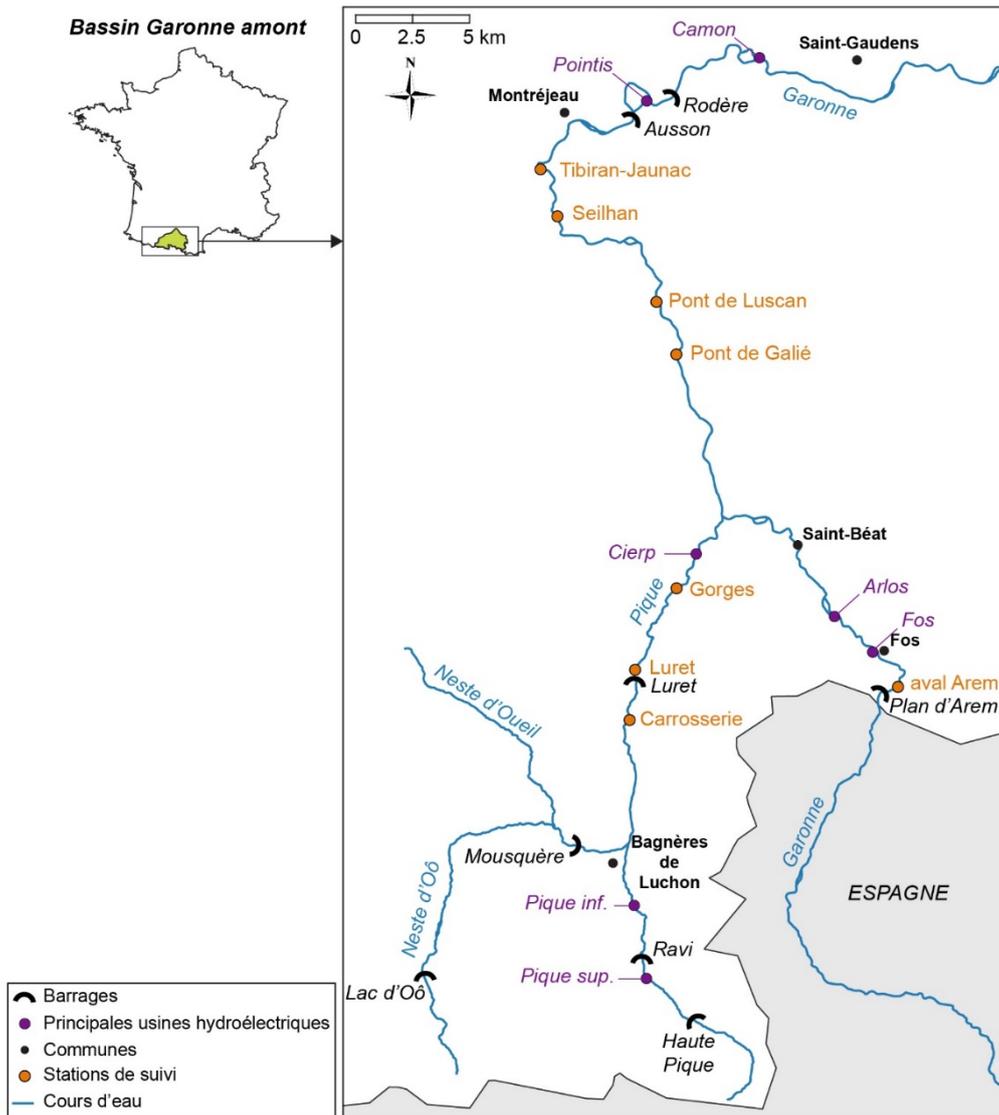
### **2.3.1.1 Cours d'eau concernés et localisation des stations**

Bien que la méthode d'évaluation du colmatage interstitiel des frayères de salmonidés par mesure de la conductivité hydraulique ait été appliquée depuis 2013 sur différentes stations, le protocole ainsi que les stations intégrées dans le réseau de suivi n'ont été définis qu'à partir de novembre 2015. La saison de reproduction 2014-2015 constitue alors une première phase d'essai de transposition de la méthode « Datry » au cas particulier des frayères de salmonidés.

Le suivi interannuel concerne finalement :

- 5 stations sur la Garonne amont (de l'amont vers l'aval) : Aval plan d'Arem, Pont de Galié, Pont de Luscan, Seilhan, Tibiran-Jaunac
- 3 stations sur la Pique (de l'amont vers l'aval) : Carrosserie, Luret, Gorges

La localisation des stations ainsi que leur position vis-à-vis des principaux ouvrages hydro-électriques sont présentées dans la Figure 6. Notons que les stations Aval plan d'Arem, Luret et Gorges sont les seules stations localisées dans des tronçons court-circuités et donc soumises aux débits réservés. Les autres stations sont potentiellement soumises aux éclusées provenant des usines hydroélectriques localisées en amont.



**Figure 6 : Localisation des stations de suivi du colmatage des frayères à salmonidés sur la Garonne et la Pique**

### 2.3.1.2 Echantillonnage et contexte hydrologique des campagnes de terrain

Afin de suivre l'évolution de la qualité du substrat après la crue morphogène de 2013 (variabilité interannuelle) mais également pendant la période de reproduction des espèces cibles (variabilité intra-annuelle), deux sessions de mesure de conductivité hydraulique ont été mises en place chaque année depuis novembre 2015 pour chaque station du suivi. Les premières et secondes campagnes de mesure sont réalisées respectivement en novembre et février, dans le but de caractériser la qualité du substrat disponible au moment de la ponte puis en fin d'incubation.

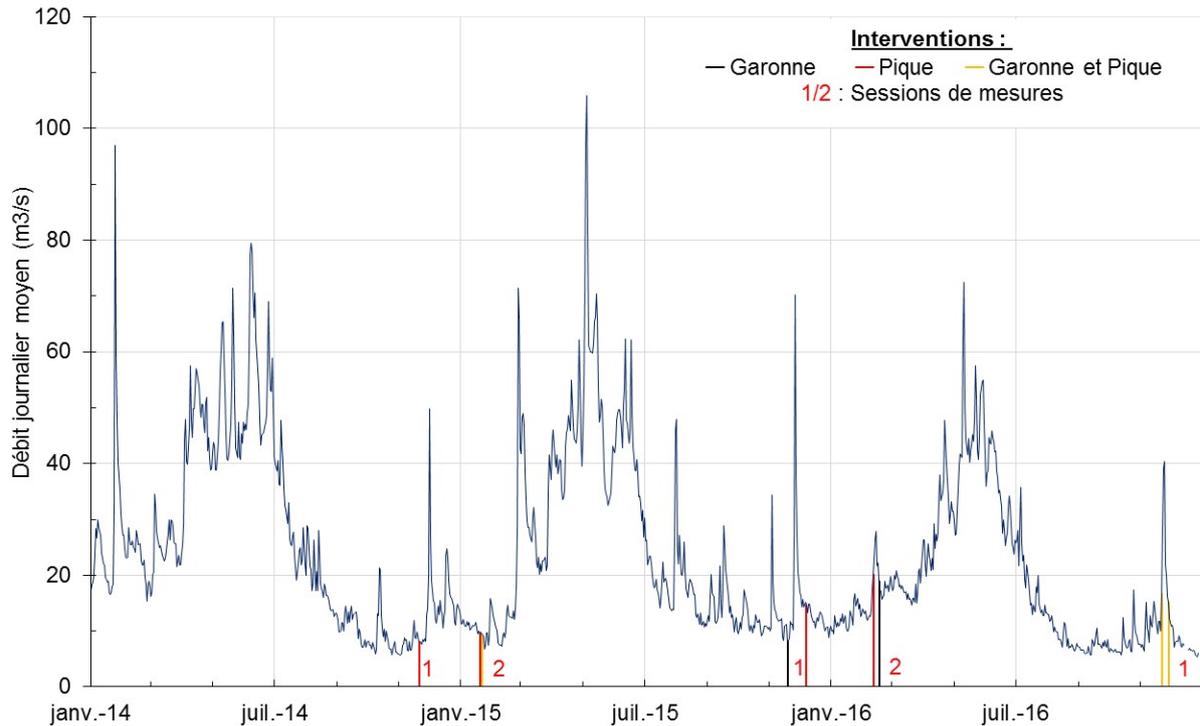
L'ensemble du planning d'échantillonnage sur la Garonne amont et la Pique est synthétisé dans le Tableau 4 ci-dessous. Rappelons que la deuxième campagne de mesures relatives à l'hiver 2016-17 n'a pas encore été effectuée à la date de réalisation du présent rapport. Elle fera l'objet d'un traitement complémentaire.

Cours d'eau	Stations	2014-15		2015-16		2016-17	
		<i>Phase d'essai</i>		Sessions			
		S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2
Garonne	Aval plan d'Arem	-	-	10	10	10	Mesures prévues pour février 2017
	Pont de Galié	-	10	10	10	10	
	Pont de Luscan	-	10	10	10	10	
	Seilhan	-	-	10	10	10	
	Tibiran-Jaunac	-	-	10	10	10	
Pique	Carrosserie	10	10	10	10	10	
	Luret	10	10	10	10	10	
	Gorges	-	10	10	10	10	
<b>TOTAL GENERAL =</b>						<b>310</b>	

**Tableau 4 : Chronique d'échantillonnage des stations du réseau de suivi Garonne-Pique de 2014 à 2016**

Afin de faciliter l'application du protocole dans le cadre du suivi interannuel, les coordonnées GPS des stations ont été relevées et des schémas des stations et de position des points de mesure sont réalisés à chaque campagne. Il peut cependant être nécessaire de réadapter la répartition des points sur une station entre deux années de suivi du fait des variations morphologiques du lit.

La Figure 7 ci-dessous présente la chronique des interventions de terrain réalisées dans le cadre du suivi sur la Pique et la Garonne tout en les replaçant dans leur contexte hydrologique. Les débits journaliers moyens (QJM) présentés sont issus de données recueillies à Saint-Béat (31) (*source : banque HYDRO*), commune occupant une position centrale vis-à-vis de l'aire d'étude et localisée en amont de la confluence entre la Pique et la Garonne. Aucune station hydrométrique n'étant localisée sur la Pique, il est alors impossible de dresser une chronique exacte de débits pour ce cours d'eau. L'hydrogramme présenté ici peut toutefois servir d'indicateur quant aux périodes de fortes hydrologies sur la Pique.



**Figure 7 : Evolution des débits journaliers moyens en Garonne, de janvier 2014 à décembre 2016, mesurés à Saint-Béat (31) (source : banque HYDRO)**

De manière générale, la Garonne à Saint-Béat présente un régime nivo-pluvial caractérisé par de fortes hydrologies de printemps liées à la fonte des neiges du massif pyrénéen et des étiages d'hiver et d'été (Bosc et al., 2012).

Notons dans un premier temps que les campagnes ont eu lieu dans de bonnes conditions hydrologiques, nécessaires au bon déroulement des mesures de terrain.

De plus, quelques épisodes d'hydrologies hivernales relativement fortes peuvent être relevés :

- celui de décembre 2014, avec un QJM maximum de 49,8 m<sup>3</sup>/s, se déroulant entre les deux sessions de mesures pour l'hiver 2014-2015.
- ceux de novembre 2015 et février 2016, avec des QJM maximums de 70,2 et 27,8 m<sup>3</sup>/s respectivement, se déroulant également entre les deux sessions de mesures pour l'hiver 2015-2016. Il est ici important de préciser que les interventions en Garonne de cet hiver-là ont eu lieu en dehors de ces épisodes pluvieux, alors que les deux sessions de mesures de la Pique sont encadrées par ceux-ci.
- celui de novembre 2016, avec un QJM maximum de 40,3 m<sup>3</sup>/s autour duquel se sont organisées les premières sessions de mesures sur la Pique et la Garonne pour l'hiver 2016-2017.

### 2.3.1.3 Traitement des données

Dans un premier temps, la conductivité hydraulique moyenne, l'écart-type et la proportion d'infiltration ont été calculés pour chaque session de chaque année, et ce pour l'ensemble des stations suivies.

Ensuite, une série de tests statistiques a été réalisée afin de traiter les thèmes d'analyses de variations de la conductivité hydraulique (K) entre les différentes stations d'un même cours d'eau par an, entre les années de suivi, ainsi que pendant la période d'incubation.

Les tests statistiques appliqués ici consistent en des tests d'hypothèses dont les seuils de signification ont été fixés à  $\alpha=5\%$ . Les hypothèses émises en rapport aux tests utilisés et la démarche de la prise de décision quant au rejet ou non de celles-ci sont rappelés en Annexe 2.

Les valeurs de conductivité hydraulique ne suivant pas une loi normale de distribution et la taille des échantillons étant relativement petite (10 points de mesure par station et par session), les conditions d'application et de validité des tests paramétriques ne sont pas respectées. C'est pourquoi les tests appliqués ici sont strictement non paramétriques et basés sur la distribution de rangs (numéros d'ordre des valeurs observées rangées par ordre croissant).

#### 2.3.1.3.1 Analyse de la variabilité spatiale

L'analyse de la variabilité des valeurs de conductivité hydraulique entre les différentes stations de suivi pour une même année est réalisée à partir d'un test de comparaisons multiples de Kruskal-Wallis (fonction *kruskal.test* du package *stats* de R). Ensuite, un test de Dunn (fonction *dunn.test* du package *dunn.test* de R) a été réalisé afin de comparer deux à deux les stations d'un même cours d'eau afin de déterminer la significativité des gradients potentiellement mis en évidence.

Cette question est traitée différemment dans le cas de la Pique en novembre 2014 car les mesures ont concerné seulement deux stations (Carrosserie et Luret) à l'occasion de cette campagne. Un test de comparaison de Wilcoxon-Mann-Whitney a été appliqué afin de comparer la conductivité hydraulique moyenne entre ces deux stations (fonction *wilcox.test* du package *stats* de R).

#### 2.3.1.3.2 Analyse de la variabilité interannuelle

Afin d'étudier l'évolution de la qualité du substrat minéral suite à la crue morphogène de 2013, les valeurs de conductivité hydraulique relevées en première campagne (novembre) de deux années successives sont comparées entre elles, et ce pour chaque station constituant le réseau de suivi. Ces comparaisons sont réalisées à partir de tests de Wilcoxon-Mann-Whitney (fonction *wilcox.test* du package *stats* de R).

#### 2.3.1.3.3 Analyse de la variabilité pendant la période d'incubation

L'objectif de cet axe d'analyse est d'étudier les potentielles variations de conductivité hydraulique et donc de la qualité du substrat des zones potentielles de frayères pendant la période d'incubation des œufs. Pour ce faire, les valeurs mesurées en première et deuxième campagne sont comparées deux à deux pour chaque station par année de suivi. Ce sont également des tests de comparaisons de Wilcoxon-Mann-Whitney qui sont appliqués ici (fonction *wilcox.test* du package *stats* de R).

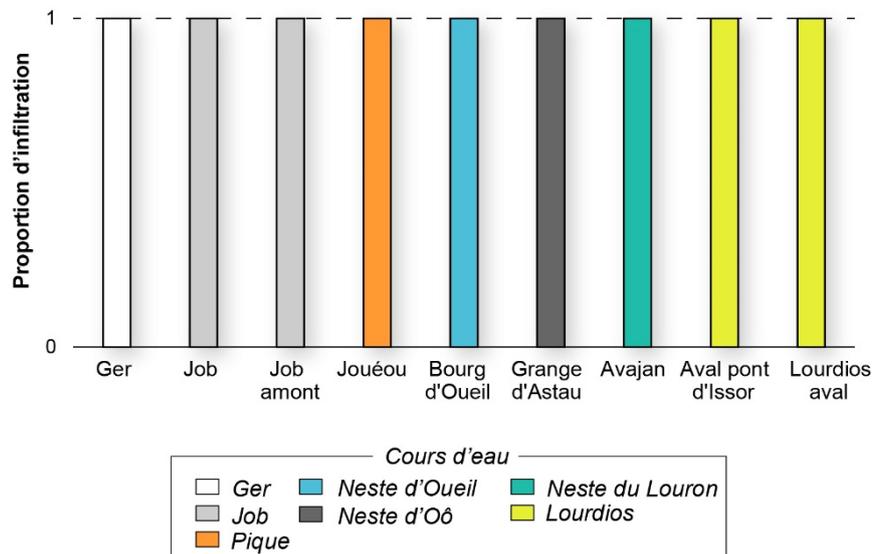
### 3 RESULTATS

#### 3.1 Axe 1 : Panel de stations de référence

Au total, 113 points de mesure ont été réalisés sur l'ensemble des 9 stations de référence.

Les stations de référence présentent toutes des proportions d'infiltration maximales ( $P=1$ ) et sont donc caractérisées par l'absence de points sans infiltration (Figure 8). Ainsi, la proportion d'infiltration semble constituer un indicateur qualitatif de la fonctionnalité d'une frayère. Une proportion d'infiltration inférieure à 1 pourrait traduire une diminution de la fonctionnalité de l'habitat de reproduction et donc indiquer indirectement une perturbation.

Notons que cette observation était faite en 2015 (Coll *et al.*, 2015) à partir de l'analyse des premières mesures de conductivité hydraulique sur stations de référence (Bourg d'Oueil, Grange d'Astau et Avajan) et se vérifie encore aujourd'hui, même après la prise en compte de références supplémentaires.



**Figure 8 : Proportions d'infiltration calculées pour les stations de référence**

La Figure 9 ci-dessous présente les valeurs de conductivité hydraulique ( $K$ ) calculée sur ces mêmes stations de référence.

Les valeurs de  $K$  sont globalement comprises entre 3 et 20cm/h et chaque station est caractérisée par une variabilité des valeurs autour de la moyenne relativement faible (écarts-types compris entre 1,77 et 6,66 cm/h).

Cependant, les conductivités hydrauliques moyennes peuvent être significativement différentes selon les stations considérées ( $X^2=28,2$ ,  $p=4,3*10^{-4}$ ). En effet, les stations Bourg d'Oueil et Job présentent des conductivités hydrauliques moyennes plus faibles que celles du Ger, de la Neste du Louron, du Lourdios et du Job amont ( $p<0,05$ , Annexe 3).

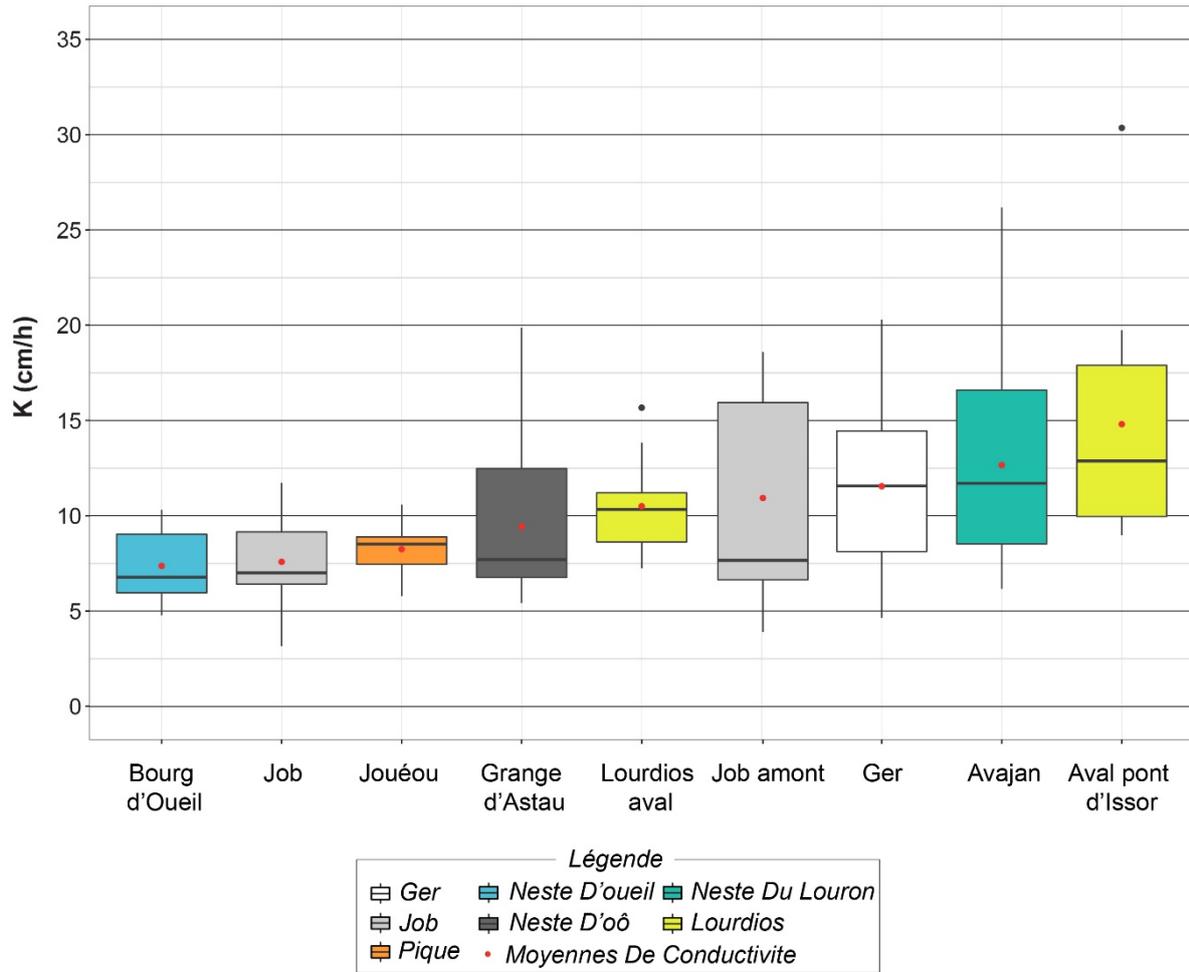


Figure 9 : Conductivité hydraulique (K) des différentes stations de référence

Cours d'eau	Stations	Nombre de points	Moyenne	Ecart-type
Neste du Louron	Avajan	9	12,66	6,54
Neste d'Oô	Grange d'Astau	12	9,43	4,2
Neste d'Oueil	Bourg d'Oueil	10	7,37	1,96
Job	Job amont	11	10,93	5,53
	Job	21	7,58	2,16
Ger	Ger	25	11,55	4,06
Pique	Jouéou	5	8,25	1,77
Lourdios	Aval pont d'Issor	10	14,8	6,66
	Lourdios aval	10	10,5	2,65

**Tableau 5 : Paramètres descriptifs de la conductivité hydraulique (cm/h) des stations de référence**

### 3.2 Axe 2 : Suivi pluriannuel post-crue de 2013

La mise en place du protocole de suivi du colmatage des habitats de reproduction de salmonidés a permis l'acquisition de 310 points de mesure sur la Garonne et la Pique de 2014 à 2016.

L'ensemble des données recueillies sur cette période est illustré en Annexe 6 et Annexe 7. Un tableau récapitulatif des paramètres statistiques calculés (moyenne, écart-type et proportion d'infiltration) est disponible en Annexe 8.

#### 3.2.1 Cas de la Garonne

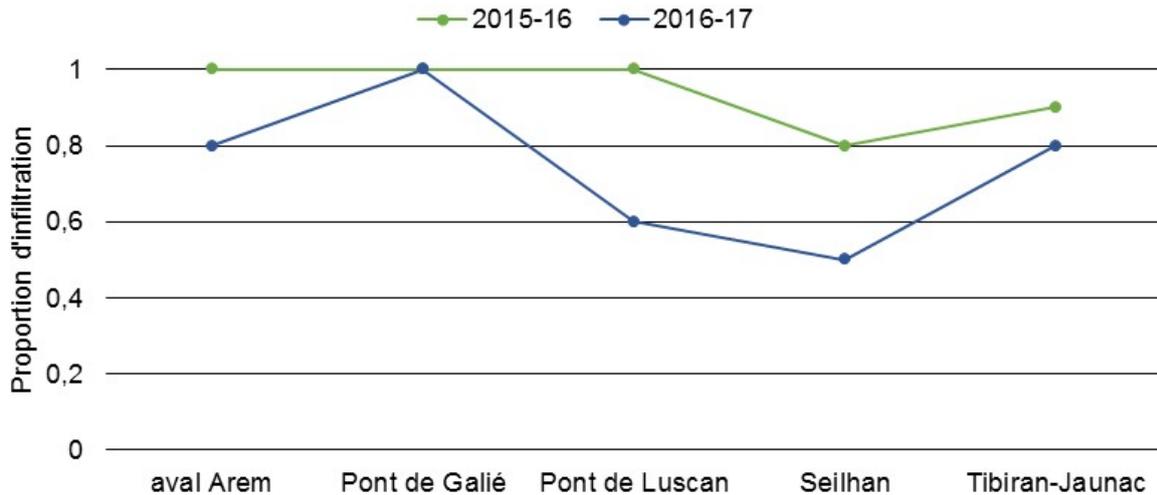
##### 3.2.1.1 Proportions d'infiltration

L'analyse des proportions d'infiltration calculées à partir des mesures réalisées en première campagne (novembre de chaque année de suivi) permet d'établir une chronique d'évolution de la qualité du substrat des habitats de reproduction sur les cours d'eau suivi au début de la période de frai.

Concernant la Garonne, le suivi de la qualité des habitats de reproduction porte sur les hivers 2015-2016 et 2016-2017 (Figure 10). En début de période de suivi (novembre 2015), les proportions d'infiltration des stations localisées les plus en amont (aval Arem, Pont de Galié et Pont de Luscan) sont maximales ( $P=1$ ) alors que les stations aval, Seilhan et Tibiran-Jaunac, présentent respectivement des proportions d'infiltration de 0,8 et 0,9.

Entre novembre 2015 et 2016, les proportions d'infiltration diminuent de 0,1 à 0,4 points selon les stations considérées. Seule la station Pont de Galié présente une proportion d'infiltration maximale sur les deux années de suivi.

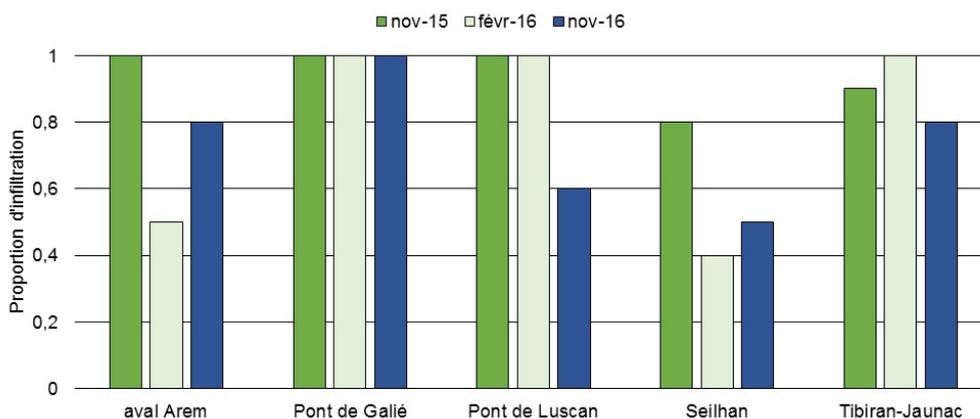
Ces résultats suggèrent que les habitats de reproduction disponibles en novembre 2015 en Garonne amont étaient fonctionnels et globalement de bonne qualité, bien qu'un léger gradient de diminution vers l'aval ait été mis en évidence. Cependant, une tendance à la diminution de la fonctionnalité des frayères suivies est observée entre les deux années de suivi, traduisant une perte progressive des effets bénéfiques de la crue de juin 2013 sur le substrat.



**Figure 10 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2015 à 2016 sur la Garonne**

La réalisation de deux sessions de mesures par station et par hiver permet d'analyser les variations de la qualité du substrat pendant la période d'incubation des œufs. Dans le cas de la Garonne, nous rappelons que cette analyse ne peut être réalisée que pour l'hiver 2015-2016. La Figure 11 présente l'évolution des proportions d'infiltration sur les différentes stations de la Garonne pendant l'hiver 2015-2016 et permet également de faire le lien avec les valeurs de novembre 2016 caractérisant l'état du substrat au début de l'hiver suivant.

Les stations aval Arem et Seilhan ont présenté une forte diminution de la proportion d'infiltration et donc de la fonctionnalité des frayères pendant la période d'incubation lors de l'hiver 2015-2016 (-0,5 et -0,4 points respectivement), suivie d'une restauration incomplète de la qualité du substrat pendant le printemps. Au contraire, la proportion d'infiltration reste stable et maximale pendant l'hiver au niveau des stations Pont de Galié et Pont de Luscan. Enfin, seule la station Tibiran-Jaunac montre une légère amélioration de la qualité du substrat pendant la période d'incubation (passage de  $P=0,9$  à 1), suivie d'une dégradation pendant le printemps conduisant à un état initial en 2016 de moins bonne qualité qu'en 2015 à la même période.



**Figure 11 : Evolution des proportions d'infiltration entre novembre 2015, février 2016 et novembre 2016 sur la Garonne**

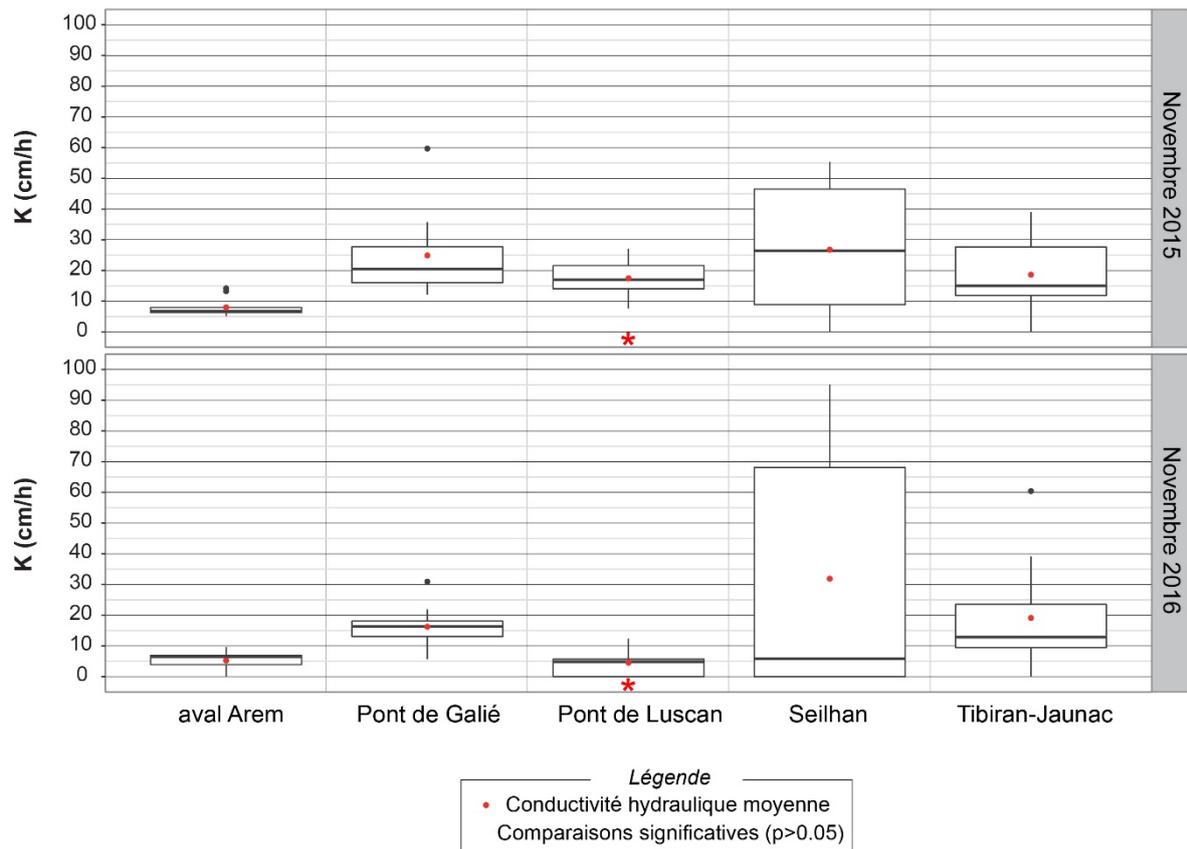
### 3.2.1.2 Conductivité hydraulique

La Figure 12 ci-dessous illustre les conductivités hydrauliques calculées en début de période de reproduction pour l'ensemble des stations sur Garonne pour les deux années de suivi.

Les analyses statistiques n'ont pas montré de différence significative de conductivité hydraulique entre les stations en novembre 2015 ( $\chi^2=7,8$  ;  $p=0,1$ ), bien que cette année-là la station aval Arem semblait présenter une moins bonne perméabilité du substrat que les autres stations. En revanche, en novembre 2016, la conductivité hydraulique (et donc la perméabilité du substrat) était significativement inférieure sur aval Arem et Pont de Luscan ( $p<0,05$ , Annexe 4).

Entre novembre 2015 et novembre 2016, on observe une tendance à la diminution des moyennes de conductivité hydraulique sur ces stations amont, non significative statistiquement pour aval Arem (de 8 à 5,2 cm/h) et Pont de Galié (de 24,9 à 16,2 cm/h) mais significative et importante pour Pont de Luscan (de 17,5 à 4,5 cm/h ;  $W=96$ ,  $p=5,6 \cdot 10^{-4}$ ). En revanche, la conductivité hydraulique moyenne reste stable entre les deux années pour Seilhan et Tibiran-Jaunac. Notons cependant une forte augmentation de la variabilité pour la station Seilhan (écarts-types de 21,6 à 40,5 cm/h), résultant d'une augmentation à la fois de la proportion de valeurs nulles et des valeurs maximales calculées.

L'ensemble de ces éléments évoque une évolution entre 2015 et 2016 dans la structure du substrat constituant les frayères. En effet, la perméabilité du substrat tend à diminuer progressivement au cours du temps, signe éventuel de l'augmentation de la proportion de matières fines dans les frayères.



**Figure 12 : Conductivité hydraulique (K) mesurée en début de période de reproduction sur la Garonne de 2015 à 2016**

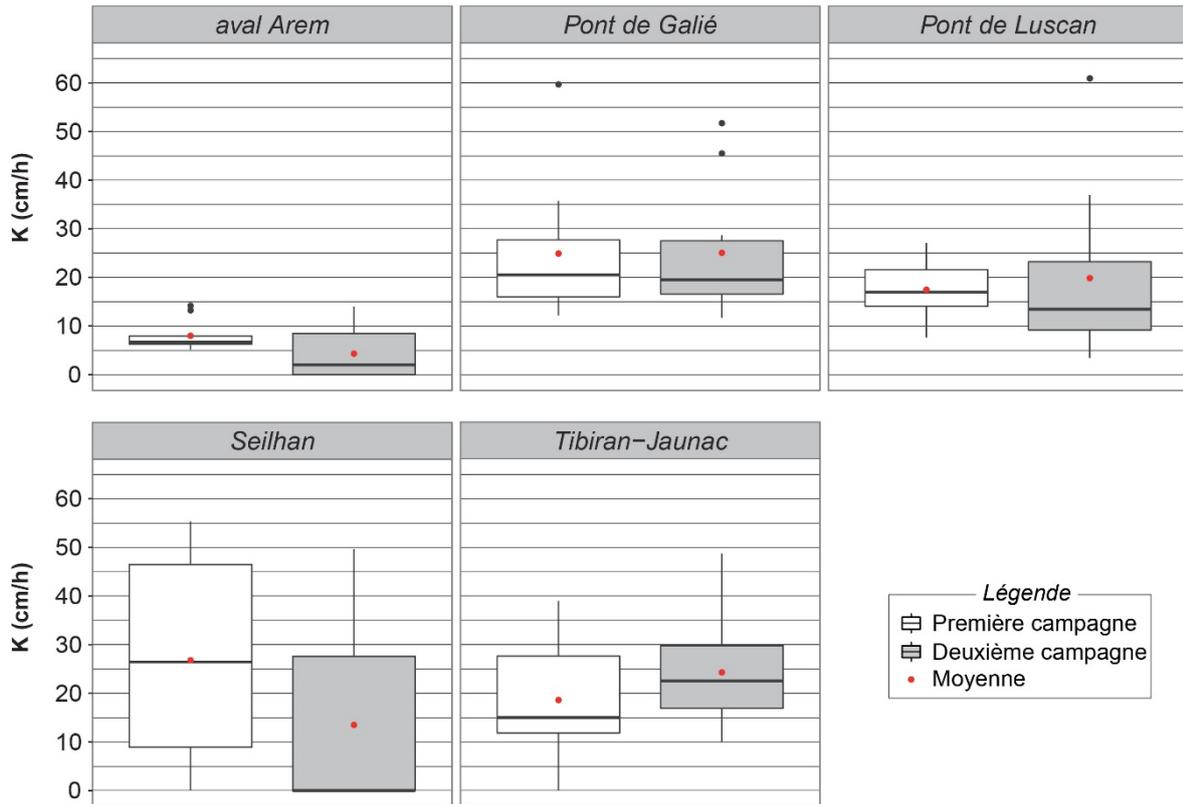
La réalisation de deux sessions de mesures par station et par hiver permet d'analyser les variations de conductivité hydraulique pendant la période d'incubation des œufs.

Dans le cas de la Garonne, cette analyse n'est réalisée que pour l'hiver 2015-2016. La Figure 13 présente l'évolution des valeurs de conductivité hydraulique et des proportions d'infiltration sur les différentes stations de la Garonne pendant l'hiver 2015-2016.

Les tests statistiques ne mettent pas en évidence de variation significative de conductivité hydraulique au cours de l'hiver 2015-2016 sur les stations suivies en Garonne ( $p > 0,05$ ). Ces résultats statistiques semblent cohérents concernant les stations Pont de Galié et Pont de Luscan, où la distribution des valeurs ainsi que les moyennes de conductivité hydraulique entre les deux passages sont très proches.

Cependant, on notera l'existence d'une tendance à la diminution de la conductivité hydraulique moyenne en aval du plan d'Arem (de 8 à 4,3 cm/h) et pour Seilhan (de 26,8 à 13,5 cm/h), non significative statistiquement du fait du chevauchement des écarts-types entre deux campagnes pour une même station. Cette évolution pourrait traduire des changements dans la composition des substrats constituant les frayères étudiées, et notamment l'augmentation de la proportion de matières fines ayant pour effet la diminution de la perméabilité.

Notons également l'évolution atypique des paramètres suivis sur la station Tibiran-Jaunac, seule station suivie sur la Garonne où la conductivité hydraulique moyenne présente une tendance à l'augmentation (de 18,6 à 24,3 cm/h).



**Figure 13 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) pendant l'hiver 2015-2016 sur les différentes stations de suivi en Garonne**

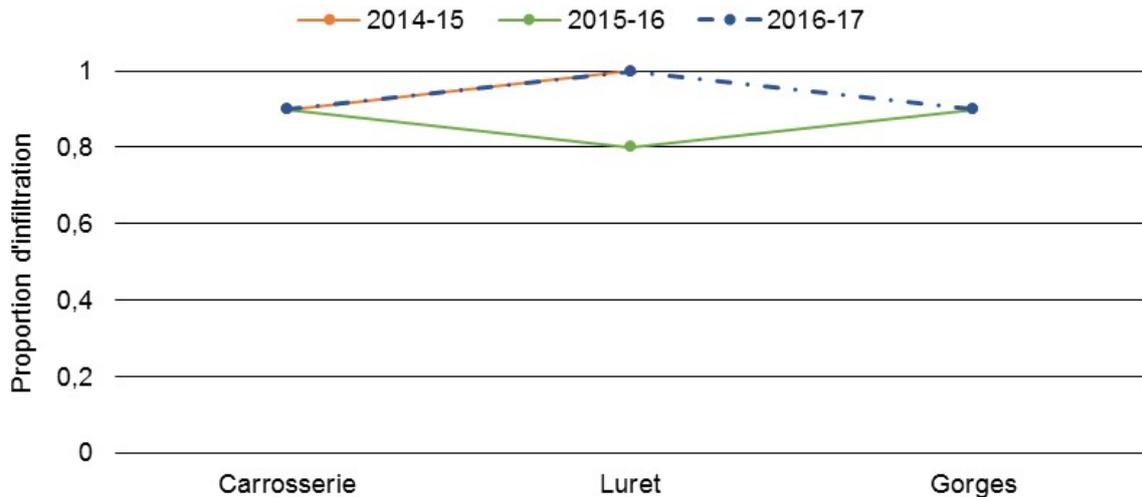
### 3.2.2 Cas de la Pique

#### 3.2.2.1 Proportions d'infiltration

L'évolution des proportions d'infiltration calculées sur la Pique à partir des mesures réalisées en début de période de reproduction est présentée dans la Figure 14. Rappelons que ces données ne sont pas disponibles pour la station des Gorges puisque celle-ci n'a été intégrée au suivi qu'à partir de février 2015.

Les stations Carrosserie et Gorges présentent des proportions d'infiltration de 0,9 pour chaque année de suivi. Au contraire, les proportions d'infiltration calculées pour la station Luret oscillent entre 1 et 0,8 selon l'année considérée.

De manière générale, les frayères étudiées sur la Pique semblent être caractérisées par une fonctionnalité perturbée. Contrairement à ce qui est observé sur la Garonne, la fonctionnalité des frayères ne semble pas se dégrader entre les années de suivi. Seule la station de Luret montre des caractéristiques et une dynamique différentes, pouvant s'expliquer par sa localisation particulière. En effet, cette station est située en aval proche du barrage de Luret, dont le fonctionnement engendre des remaniements fréquents et importants de matériaux.



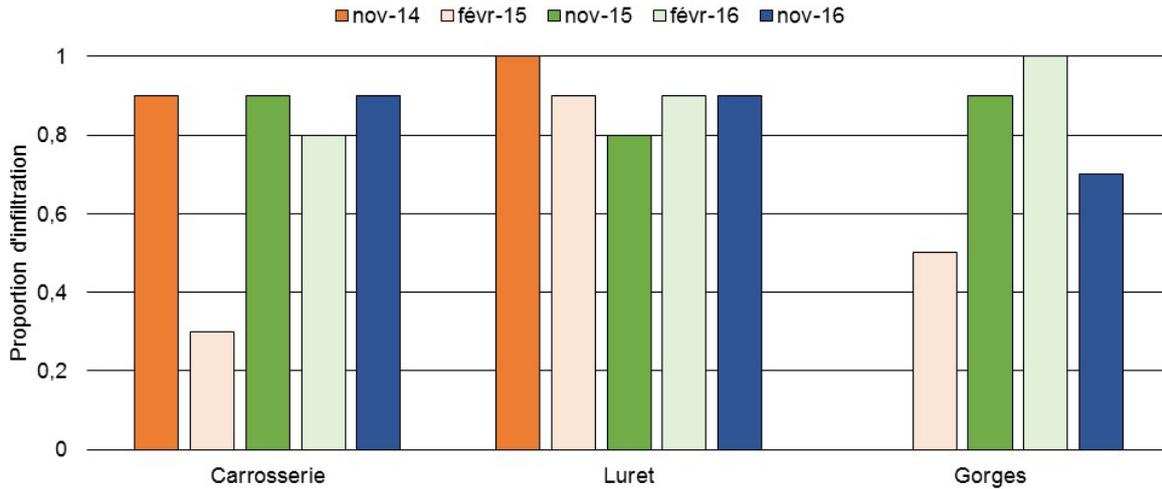
**Figure 14 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2014 à 2016 sur la Pique**

L'analyse des variations des proportions d'infiltration pendant l'hiver peut être réalisée à partir des données de 2014-2015 et 2015-2016 pour les stations Carrosserie et Luret, et seulement pour 2015-2016 pour la station Gorges. Ces données sont illustrées sur la Figure 15.

Globalement, les proportions d'infiltration présentent une faible variabilité pendant la période d'incubation des œufs. En effet, ce paramètre varie très peu entre deux campagnes successives d'un même hiver (+/- 0,1 point). Notons que seules les valeurs enregistrées sur la Carrosserie font exception puisque celles-ci révèlent une perte sévère de fonctionnalité au cours de l'hiver 2014-2015 (-0,6 point).

Ces éléments pourraient être rapprochés du contexte hydrologique caractérisant les périodes d'intervention. Rappelons qu'aucune donnée de débits n'est disponible pour la Pique sur la durée du suivi. Ainsi, les débits enregistrés sur la Garonne à Saint Béat servent d'indicateur des périodes de fortes hydrologies pour le haut bassin (cf. § 2.3.1.212).

L'hydrologie était relativement stable entre les campagnes de 2015-2016, ce qui pourrait expliquer les faibles variations des proportions d'infiltration observées cet hiver là sur la Pique. En revanche, les campagnes de terrain de 2014-2015 ont potentiellement encadré un épisode de crue en novembre 2014. La Carrosserie étant une station localisée en amont du barrage de Luret et donc non soumise au débit réservé, il est probable que les sédiments aient été davantage remaniés au niveau de cette station à l'occasion de la crue de novembre 2014.



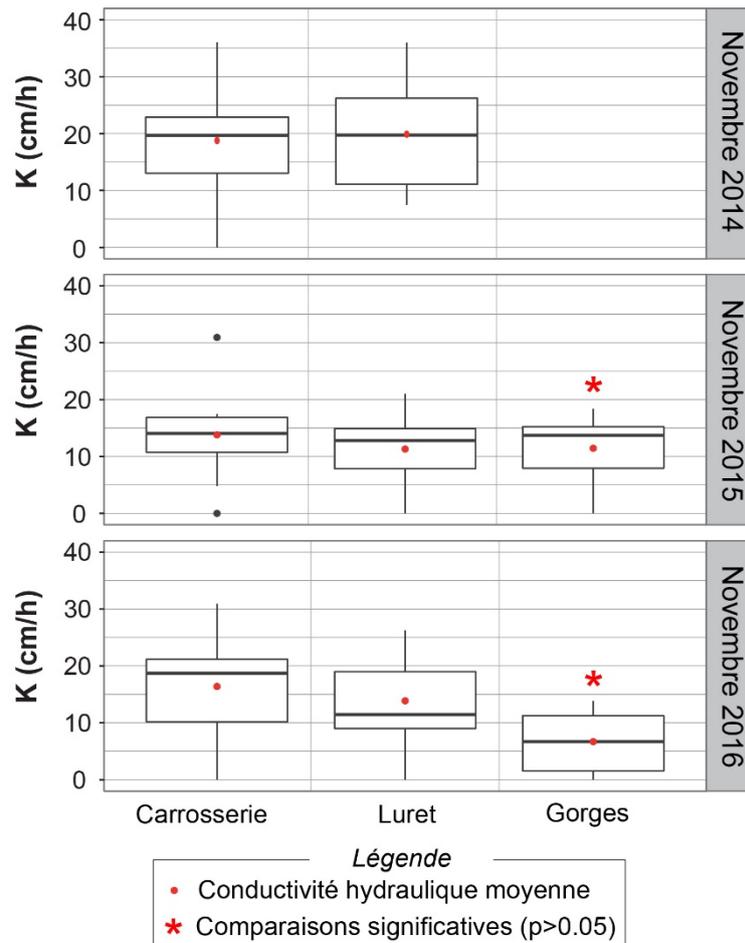
**Figure 15 : Evolution des proportions d'infiltration entre novembre 2014 et novembre 2016 sur la Pique**

### 3.2.2.2 Conductivité hydraulique

La Figure 16 présente la conductivité hydraulique mesurée sur l'ensemble des stations suivies sur la Pique en début de période de reproduction, de novembre 2014 à novembre 2016.

Les analyses statistiques ne mettent pas en évidence de différence en termes de conductivité hydraulique moyenne entre les stations suivies, que ce soit en 2014 ( $W=50$ ,  $p=1$ ) ou en 2015 ( $X^2=0,7$ ,  $p=0,69$ ). De plus, on observe une tendance à la diminution de la conductivité hydraulique entre les deux premières années de suivi (environ de 19 à 12 cm/h) qui n'est toutefois pas statistiquement significative ( $p>0,05$ ). Il semblerait que la perméabilité du substrat des frayères suivies reste relativement homogène dans l'espace et dans le temps.

Les observations sont toutefois différentes à propos des données recueillies en 2016. Une hétérogénéité spatiale est mise en évidence cette année-là entre les trois stations ( $X^2=7,40$ ,  $p=0,025$ ). En effet, la conductivité hydraulique moyenne a diminué entre 2015 et 2016 dans les Gorges ( $W=78,5$ ,  $p=0,03$ ), mais est restée stable pour les deux stations amonts ( $p>0,05$ ), générant ainsi un gradient de diminution de ce paramètre vers l'aval (Annexe 5).

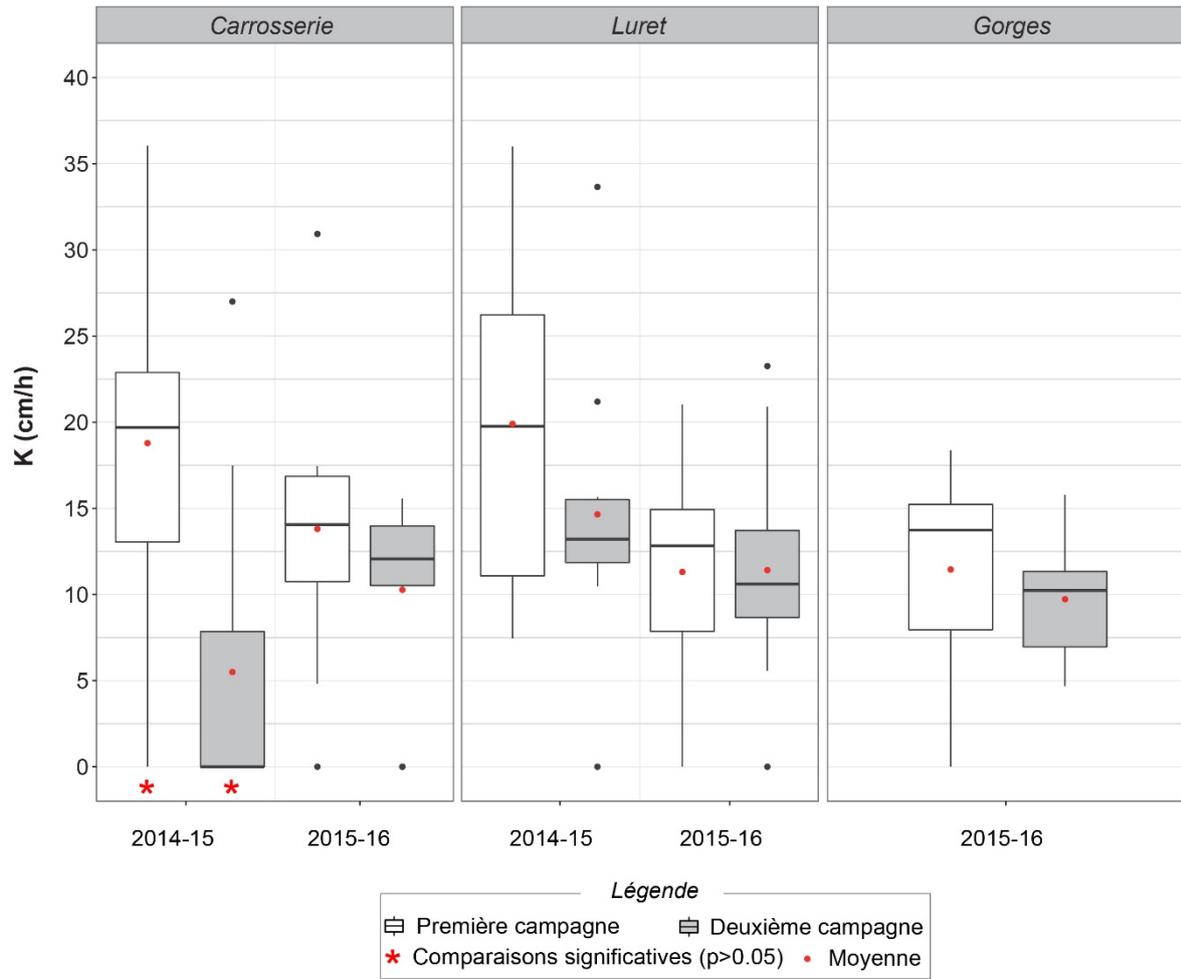


**Figure 16 : Conductivité hydraulique (K) mesurée en début de période de reproduction sur la Pique de 2014 à 2016**

L'analyse des variations de la conductivité hydraulique pendant l'hiver peut être réalisée à partir des données de 2014-2015 et 2015-2016 pour les stations Carrosserie et Luret, et seulement pour 2015-2016 pour la station Gorges. Ces données sont illustrées sur la Figure 17.

Bien qu'une tendance à la diminution de la conductivité hydraulique moyenne est mise en évidence pendant la période d'incubation des œufs, cette variation n'est statistiquement significative que dans le cas de la Carrosserie pendant l'hiver 2014-2015 (de 19,6 à 5,5cm/h,  $W=83,5$ ,  $p=0,01$ ).

Comme expliqué plus haut au sujet de la variation de la proportion d'infiltration pendant la période d'incubation (cf. § 3.2.2.1 p.22), ces éléments pourraient être reliés au contexte hydrologique particulier caractérisant les mesures de terrain de l'hiver 2014-2015 ainsi qu'à la position relative des stations vis-à-vis du barrage de Luret.



**Figure 17 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) pendant les hivers 2014-2015 et 2015-2016 sur les différentes stations de suivi sur la Pique**

## 4 BILAN ET PERSPECTIVES

---

Cette étude constitue une deuxième étape dans le processus d'adaptation de la méthode de conductivité hydraulique au cas particulier des habitats de reproduction des salmonidés.

- **Stations de référence :**

Tout d'abord, les observations faites à l'occasion du rapport préliminaire de 2015 ont été renforcées, au sujet notamment des stations de référence. Il apparaît ici que les stations non perturbées sont toujours décrites par une proportion d'infiltration de 1 (c'est-à-dire que tous les points de mesure présentent une infiltration), des valeurs de conductivité hydraulique comprises entre 3 et 20 cm/h ainsi que par une faible variabilité autour de la moyenne (traduite par de faibles écarts-types). Ces variables-là constituent à priori des indicateurs toujours pertinents dans la description du degré de perturbation d'une station, et ce même après l'ajout de nouvelles stations de référence.

Pendant, les caractéristiques décrites plus haut sont basées sur des mesures uniques de conductivité hydraulique. Il serait alors intéressant d'enrichir le panel de stations de référence avec des mesures répétées telles que celles réalisées dans le cadre du suivi, afin d'analyser le degré de stabilité des indicateurs au cours du temps. Ceci permettrait notamment de finaliser la démarche de validation de ces paramètres descriptifs des stations de référence pour les cours d'eau étudiés.

Enfin, il est important de rappeler que les stations de référence sont localisées dans des cours d'eau plus petits que ceux étudiés dans le cadre du suivi, du fait du manque de référence « grand cours d'eau non perturbé » dans les Pyrénées.

- **Suivi interannuel :**

Le suivi réalisé sur la Garonne a mis en évidence l'existence d'un léger gradient de diminution vers l'aval de la qualité des habitats de reproduction de salmonidés, avec en 2015 la présence de frayères potentielles à priori plus fonctionnelles sur les trois stations les plus amont. De plus, une tendance à la perte de fonctionnalité des frayères est observée entre 2015 et 2016 pour 4 des 5 stations suivies. Cette perte de fonctionnalité se perçoit notamment par la tendance à la diminution de la perméabilité du substrat entre les deux années de suivi.

Les conclusions faites sur l'évolution de la qualité du substrat pendant la période d'incubation des œufs sont différentes selon les stations considérées. Seules les stations aval Arem et Seilhan présentent une dégradation de la qualité des frayères et une diminution de la perméabilité du substrat pendant l'hiver, suivie d'une restauration de la qualité de ces habitats pouvant être reliée aux fortes hydrologies de printemps. Les autres stations (Pont de Galié, Pont de Luscan) semblent moins soumises à ce phénomène.

La Pique quant à elle, présente des frayères moins fonctionnelles mais dont l'état ne semble pas se dégrader entre 2015 et 2016. En revanche, les analyses réalisées à un pas de temps plus fin montrent des fluctuations de fonctionnalité et/ou de perméabilité du substrat pendant la période d'incubation des œufs. Comme il a été observé sur certaines stations de suivi sur la Garonne, la perméabilité du substrat tend à diminuer pendant l'hiver puis se restaure totalement ou partiellement pendant le printemps. L'amplitude de ces variations est-elle fonction des conditions hydrologiques de la saison de reproduction mais également de la position de la frayère vis-à-vis des aménagements hydroélectriques.

Rappelons que les observations faites dans ce rapport se basent sur l'analyse de deux à trois saisons de reproduction selon les stations. La poursuite du suivi du colmatage permettra l'acquisition de données supplémentaires afin de disposer de davantage de recul, notamment sur les processus mis en cause.

- **Méthodologie :**

Certaines stations de suivi comme Seilhan ou Luret présentent de fortes variabilités des valeurs de conductivité hydraulique autour de la moyenne. Se pose alors la question de la significativité de ces grands écarts-types à l'échelle d'une station. Cette forte variabilité pourrait résulter d'un biais méthodologique. En effet, certaines stations présentent parfois une couche d'armure ou bien une granulométrie plus grossière, rendant difficile l'insertion du mini-piézomètre sans déstructuration du substrat au droit du tube. Ces configurations pourraient engendrer des fuites d'eau le long du tube au moment de la mesure et donc des valeurs anormalement élevées de conductivité hydraulique caractérisant un artefact et non une réelle perméabilité du substrat. De la fluorescéine sera intégrée aux mesures de conductivité hydraulique de février 2017 afin de détecter les éventuelles fuites d'eau et d'analyser leur potentielle influence sur les valeurs de conductivité hydraulique.

Enfin, il serait intéressant d'intégrer de nouvelles stations au suivi réalisé sur la Pique, dans la mesure des habitats de reproduction disponibles, afin de mieux caractériser l'évolution de la fonctionnalité des frayères sur ce cours d'eau. En effet, les résultats suggèrent que la station Luret est fortement influencée par le barrage localisé strictement en amont. Il est alors difficile de généraliser les conclusions faites à partir des deux stations restantes.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- BARDONNET A., BAGLINIERE J.L., 2000. Freshwater habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, vol. 57, no 2, p. 497-506.
- BARLAUP B.T., GABRIELSEN S.E., SKOGLUND H., WIERS T., 2008. Addition of spawning gravel - a means to restore spawning habitat of atlantic salmon (*Salmo salar* L.), and Anadromous and resident brown trout (*Salmo trutta* L.) in regulated rivers. *River Research and Applications*, vol. 24, no 5, p. 543-550.
- BELAND K.F., JORDAN R.M., MEISTER A.L., 1982. Water depth and velocity preferences of spawning Atlantic salmon in Maine rivers. *North American Journal of Fisheries Management*, vol. 2, no 1, p. 11-13.
- BOSC S., NARS A., MENCHI O., 2012. Etude de l'impact des éclusées hydroélectriques sur les peuplements piscicoles du haut bassin de la Garonne. Action MPIEG 11. Rapport MI.GA.DO, 45p.
- BRUSLÉ J., QUIGNARD J.P., 2001. *Biologie des poissons d'eau douce européens*. Lavoisier, 2001.
- CHAPMAN D.W., 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 117, no 1, p. 1-21.
- COLL M., DURBE G., BOSC S., MENCHI O., 2015. Evaluation du colmatage du substrat des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont – Année 2015. Rapport MPHABI15, 27p.
- CRISP D.T., 1996. Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia*, vol. 323, no 3, p. 201-221.
- CRISP D. T., CARLING P. A., 1989. Observations on siting, dimensions and structure of salmonid redds. *Journal of Fish Biology*, vol. 34, no 1, p. 119-134.
- DATRY T, 2011. Colmatage interstitiel des cours d'eau : Développement d'un protocole de mesure standardisé sur les réseaux de contrôle de surveillance français. Rapport final, 106p.
- DUPONT E, 1998. Entretien des cours d'eau et l'habitat des poissons. Publication de la Division de l'eau, Direction des cours d'eau non navigables, 136 p.  
 Dans : MOTTE G, 2005. Moule perlière et exploitation forestière : un couple à réinventer. Forêt Wallonne, no 74, p. 14-23.
- GAUDEMAR B., SCHRODER S.L., BEALL E.P., 2000. Nest placement and egg distribution in Atlantic salmon redds. *Environmental Biology of Fishes*, vol. 57, no 1, p. 37-47.
- GAYRAUD S., HÉROUIN E., PHILIPPE M., 2002. Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements de macroinvertébrés. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, no 365-366, p. 339-355.
- GIBSON R.J., 1993. The Atlantic salmon in fresh water: spawning, rearing and production. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol. 3, no 1, p. 39-73.

GROST R.T., HUBERT W.A., WESCHE T.A., 1991. Description of brown trout redds in a mountain stream. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 120, no 5, p. 582-588.

GUEGUEN J.C., PROUZET P. (eds), 1994. *Le saumon atlantique: biologie et gestion de la ressource*. Editions Quae.

HEGGBERGET T.G., 1991. Some environmental requirements of Atlantic salmon. *Fisheries Bioengineering Symposium: American Fisheries Society Symposium 10*. p. 132.

Dans : ARMSTRONG J. D., KEMP P. S., KENNEDY G. J. A., LADLE M., MILNER N.J., 2003. Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries research*, vol. 62, no 2, p. 143-170.

JONES J.W., 1959. *The Salmon*. London: Collins. 192 p.

Dans : GIBSON R. J., 1993. The Atlantic salmon in fresh water: spawning, rearing and production. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol. 3, no 1, p. 39-73.

LOUHI P., MÄKI-PETÄYS A., ERKINARO J., 2008. Spawning habitat of Atlantic salmon and brown trout: general criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*, vol. 24, no 3, p. 330-339.

MALAVOI J.R., SOUCHON Y., 1989. Méthodologie de description, quantification des variables morphodynamiques d'un cours d'eau à fond caillouteux : exemple d'une station sur la Fillière (Haute-Savoie). *Revue de géographie de Lyon*, vol. 64, p. 252-259.

MOIR H. J., SOULSBY C., YOUNGSON A., 1998. Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by Atlantic salmon for spawning in the Girnock Burn, Scotland. *Fisheries Management and Ecology*, vol. 5, no 3, p. 241-254.

OTTAWAY E. M., CARLING P. A., CLARKE A., READER N.A., 1981. Observations on the structure of brown trout, *Salmo trutta* Linnaeus, redds. *Journal of Fish Biology*, vol. 19, no 5, p. 593-607.

PETERSON R.H., 1978. Physical characteristics of Atlantic salmon spawning gravel in some New Brunswick streams. Canadian Fisheries and Marine Service Technical Report 785, St. Andrews, New Brunswick, Canada.

SHIRVELL C.S., DUNGEY R.G., 1983. Microhabitats chosen by brown trout for feeding and spawning in rivers. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 112, no 3, p. 355-367.

WITZEL L.D., MACCRIMMON H.R., 1983. Redd-site selection by brook trout and brown trout in southwestern Ontario streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 112, no 6, p. 760-771.

WOOD P.J., ARMITAGE P.D., 1997. Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental management*, vol. 21, no 2, p. 203-217.

### **SITES INTERNET CONSULTÉS :**

Banque HYDRO – Eaufrance : débits journaliers moyens de 2014 à 2016 à Saint-Béat (31)

Consulté le 6 février 2017 sur : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

## **ANNEXES**

---



## Annexe 2 : Rappel des principes fondamentaux autour des tests d'hypothèses

Les analyses statistiques réalisées dans ce rapport consistent en des tests dits « d'hypothèses ». Ce sont des procédés d'inférence qui permettent de contrôler à partir de l'analyse d'un ou plusieurs échantillons la validité d'hypothèses relatives à une ou plusieurs populations. Il est alors possible de déterminer si les différences constatées entre  $k$  échantillons sont dues au hasard ou bien si elles sont suffisamment importantes pour signifier que les échantillons proviennent de populations différentes.

Dans cette famille de tests statistiques, on distingue :

- les tests paramétriques reposant sur des conditions d'applications telles que la distribution des variables selon une loi normale
- les tests non paramétriques pour lesquels aucun paramètre n'est calculé (comme la moyenne et l'écart-type) et seule une équivalence de forme de distribution est requise

De manière générale, deux hypothèses sont formulées à l'occasion d'un test :

- Une hypothèse nulle ( $H_0$ ) selon laquelle il n'y a pas de différence entre les paramètres comparés ou du moins que la différence n'est pas significative et peut être imputée aux erreurs d'échantillonnage.
- Une hypothèse alternative ( $H_1$ ), négation de l'hypothèse précédente et selon laquelle les  $k$  échantillons proviennent bien de populations différentes.

L'objectif des tests est de calculer une probabilité ( $p$ ) relative à l'hypothèse nulle. Autrement dit,  $p$  indique s'il est probable que les  $k$  échantillons soient issus d'une même population. Un seuil  $\alpha$  de signification (risque de rejeter  $H_0$  alors qu'elle est vraie) est alors fixé ici à 5%. Lorsque  $p$  est inférieure à 5%, il est peu probable que l'hypothèse  $H_0$  soient vraie et celle-ci est rejetée ; les échantillons sont issus de populations différentes.

Dans le cas du test de *Wilcoxon-Mann-Whitney* (comparaison de deux échantillons) appliqué ici, les hypothèses émises sont les suivantes :

$H_0$  : les fonctions de répartition des deux échantillons sont identiques  
 $H_1$  : il existe une différence significative dans la répartition de la variable entre les deux échantillons

Dans le cas du test de Kruskal-Wallis (comparaisons de  $k$  échantillons), les hypothèses émises sont les suivantes :

$H_0$  : les fonctions de répartition des  $k$  échantillons sont identiques  
 $H_1$  : au moins un échantillon présente une fonction de répartition différente

NB : Lorsque la *p-value* d'un test de Kruskal-Wallis est inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est rejetée. Un test post-hoc de comparaisons multiples de Dunn est appliqué afin de savoir quel(s) échantillon(s) diffère(nt) des autres. Dans ce cas, les hypothèses émises sont similaires à celles formulées dans le cas d'un test de Wilcoxon-Mann-Whitney.

**Annexe 3 : Résultats du test de comparaisons deux à deux (Dunn)  
des conductivités hydrauliques moyennes des stations de référence**

Pour chaque paire de comparaisons, la première valeur (haut) correspond à la valeur statistique du test de Dunn et la seconde (bas) correspond à la p-value associée.

Les valeurs surlignées correspondent aux p-values inférieures au seuil de 5%, indiquant les paires de comparaisons significatives.

	Avajan	Aval pont d'Issor	Bourg d'Oueil	Ger	Grange d'Astau	Job	Job amont	Jouéou
Aval pont d'Issor	-1,13 0,13							
Bourg d'Oueil	2,38 0,0086	3,61 0,0002						
Ger	-0,16 0,44	1,22 0,11	-3,1 0,001					
Grange d'Astau	1,26 0,1	2,5 0,006	-1,26 0,1	1,76 0,04				
Job	2,41 0,008	3,85 0,0001	-0,35 0,36	3,46 0,0003	1,13 0,13			
Job amont	0,74 0,23	1,95 0,03	-1,74 0,04	1,1 0,14	-0,53 0,3	-1,68 0,046		
Jouéou	1,24 0,1	2,2 0,01	-0,74 0,23	1,54 0,06	0,26 0,4	-0,54 0,29	0,66 0,25	
Lourdios	0,13 0,45	1,29 0,1	-2,32 0,01	0,33 0,37	-1,16 0,12	-2,35 0,01	-0,63 0,26	-1,15 0,12

#### Annexe 4 : Résultats du test de comparaison des stations deux à deux (Dunn) des conductivités hydrauliques moyennes mesurées en novembre 2016 sur la Garonne

Pour chaque paire de comparaisons, la première valeur (haut) correspond à la valeur statistique du test de Dunn et la seconde (bas) correspond à la p-value associée.

Les valeurs surlignées correspondent aux p-values inférieures au seuil de 5%, indiquant les paires de comparaisons significatives.

	Aval Arem	Pont de Galié	Pont de Luscan	Seilhan
Pont de Galié	-2,6			
	0,0047			
Pont de Luscan	0,34	2,94		
	0,37	0,0016		
Seilhan	-1,13	1,47	-1,47	
	0,13	0,071	0,071	
Tibiran Jaunac	-1,95	0,65	-2,29	-0,82
	0,026	0,26	0,011	0,21

### Annexe 5 : Résultats du test de comparaison des stations deux à deux (Dunn) des conductivités hydrauliques moyennes mesurées en novembre 2016 sur la Pique

Pour chaque paire de comparaisons, la première valeur (haut) correspond à la valeur statistique du test de Dunn et la seconde (bas) correspond à la p-value associée.

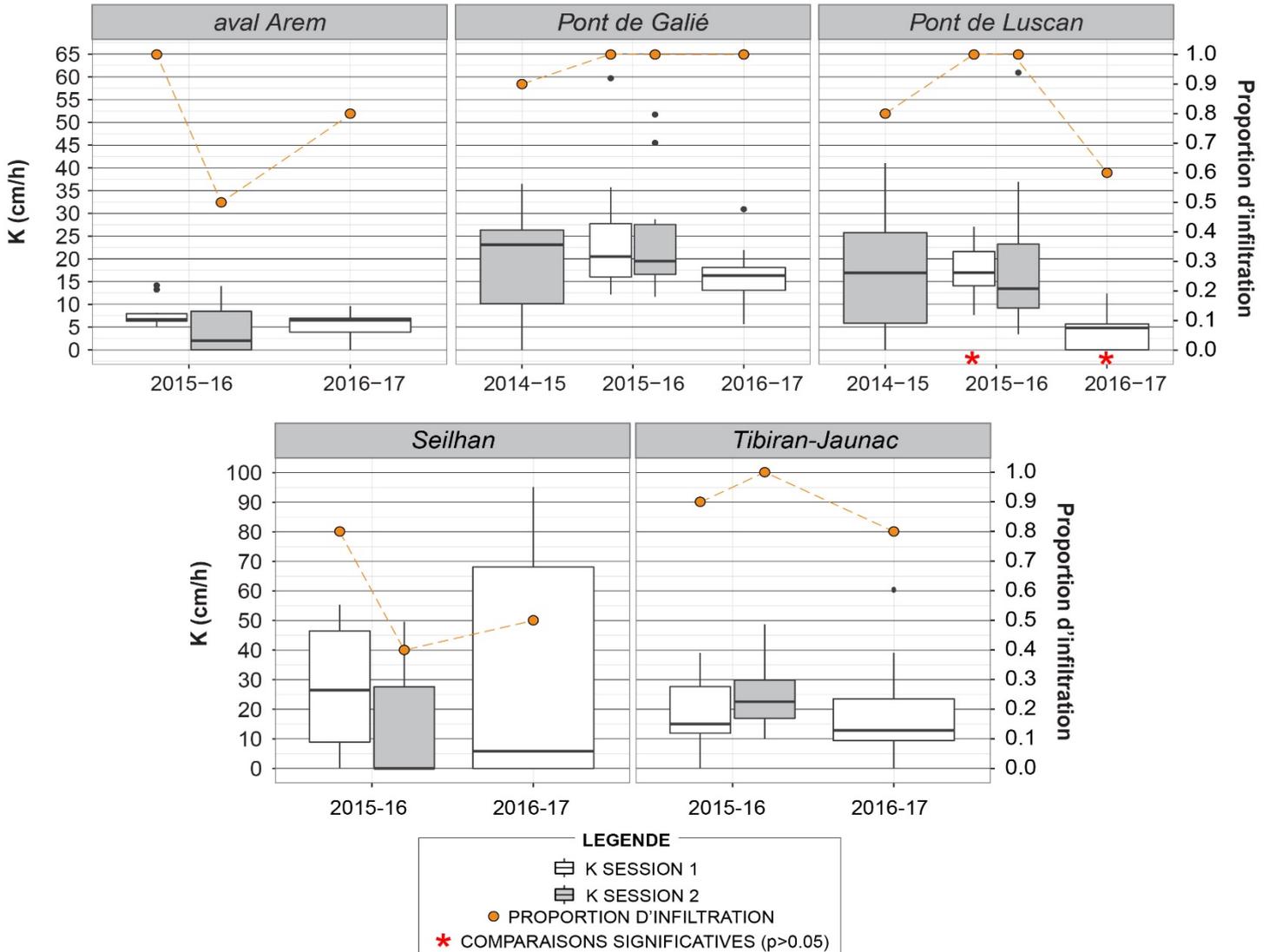
Les valeurs surlignées correspondent aux p-values inférieures au seuil de 5%, indiquant les paires de comparaisons significatives.

	Carrosserie	Gorges
Gorges	2,6	
	0,0047	
Luret	0,61	-1,99
	0,27	0,024

**Annexe 6 : Evolution de la conductivité hydraulique (K, cm/h) et de la proportion d'infiltration, de 2014 à 2016 sur les différentes stations de suivi en Garonne**

Les astérisques marquent les comparaisons significatives ( $p > 0,05$ ).

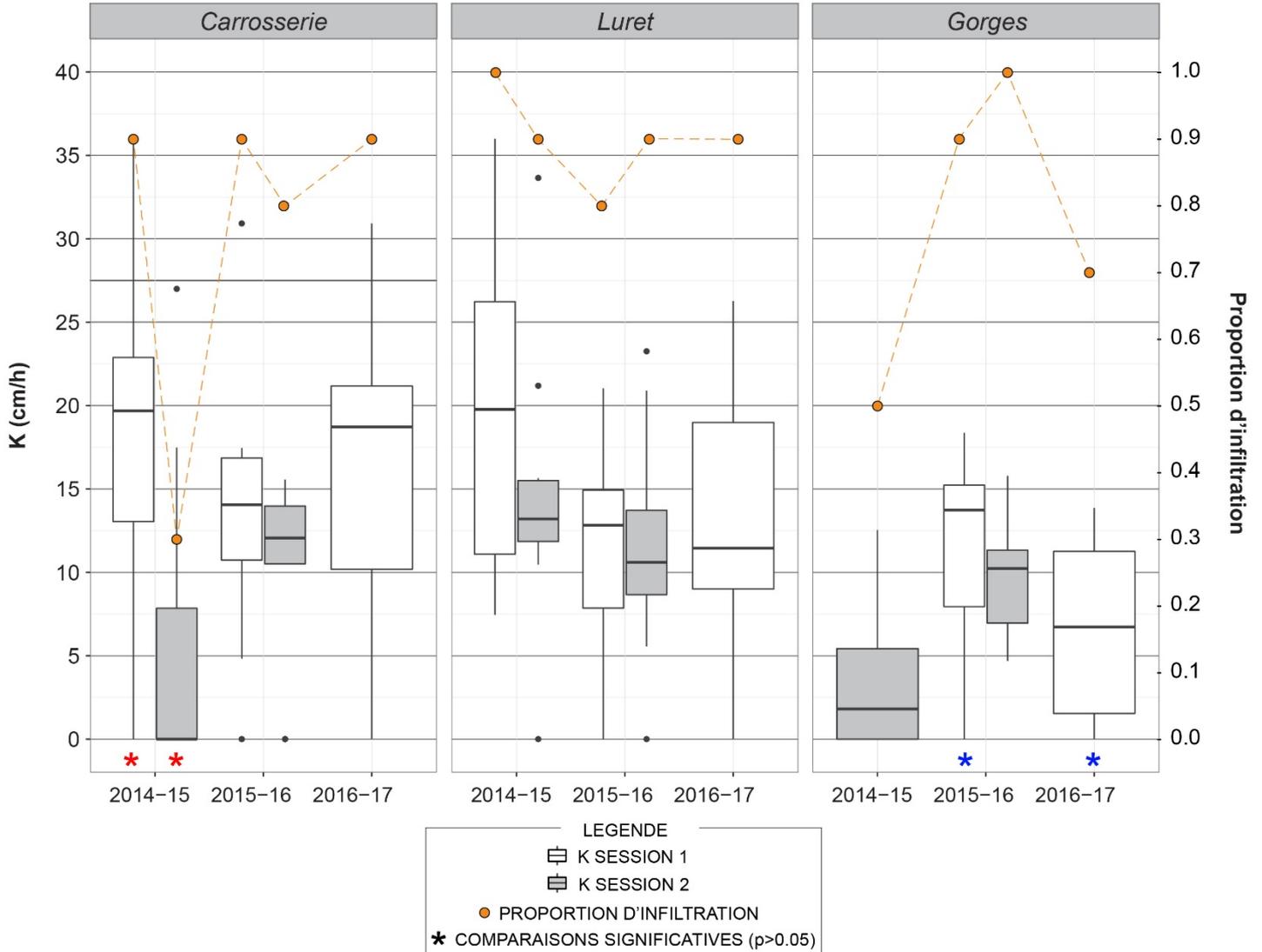
Les astérisques d'une même couleur représentent les deux sessions de mesures comparées entre elles.



**Annexe 7 : Evolution de la conductivité hydraulique (K, cm/h) et de la proportion d'infiltration de 2014 à 2016 sur les différentes stations de suivi sur la Pique**

Les astérisques marquent les comparaisons significatives ( $p > 0,05$ ).

Les astérisques d'une même couleur représentent les deux sessions de mesures comparées entre elles.



**Annexe 8 : Tableau récapitulatif des paramètres descriptifs (moyennes, écart-types et proportion d'infiltration) calculés pour chaque station à l'occasion de chaque session de mesure sur la durée du suivi.**

Nous rappelons que les données de deuxième campagne pour l'hiver 2016-2017 (zone grisée) seront traitées dans le rapport de 2017.

		Moyenne (K, cm/h)						Ecart-type (K, cm/h)						Proportion d'infiltration					
		2014-15		2015-16		2016-17		2014-15		2015-16		2016-17		2014-15		2015-16		2016-17	
		S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Garonne	aval Arem	-	-	8.0	4.3	5.2		-	-	3.1	5.2	3.2		-	-	1	0.5	0.8	
	Pont de Galié	-	19	24.9	25.1	16.2		-	11.3	14.1	13.3	7.1		-	0.9	1	1	1	
	Pont de Luscan	-	17.4	17.5	19.9	4.5		-	14.9	6.4	17.4	4.7		-	0.8	1	1	0.6	
	Seilhan	-	-	26.8	13.5	31.9		-	-	21.6	19.6	40.5		-	-	0.8	0.4	0.5	
	Tibiran-Jaunac	-	-	18.6	24.3	19.1		-	-	12.5	11.3	18.7		-	-	0.9	1	0.8	
Pique	Carrosserie	19.6	5.5	13.8	10.3	16.4		10.2	9.7	8.2	5.7	8.7		0.9	0.3	0.9	0.8	0.9	
	Luret	19.9	14.6	11.3	11.4	13.9		9.9	8.5	7.2	6.8	8.2		1	0.9	0.8	0.9	0.9	
	Gorges	-	3.6	11.4	9.7	6.7		-	4.5	5.5	3.5	5.2		-	0.5	0.9	1	0.7	

## Opération financée par :



Cette action est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Midi-Pyrénées avec le Fond européen de développement régional.



**Association MIGADO**

18 Ter Rue de la Garonne - BP 95 - 47520 LE PASSAGE D'AGEN

Tel : 05 53 87 72 42

www.migado.fr - 