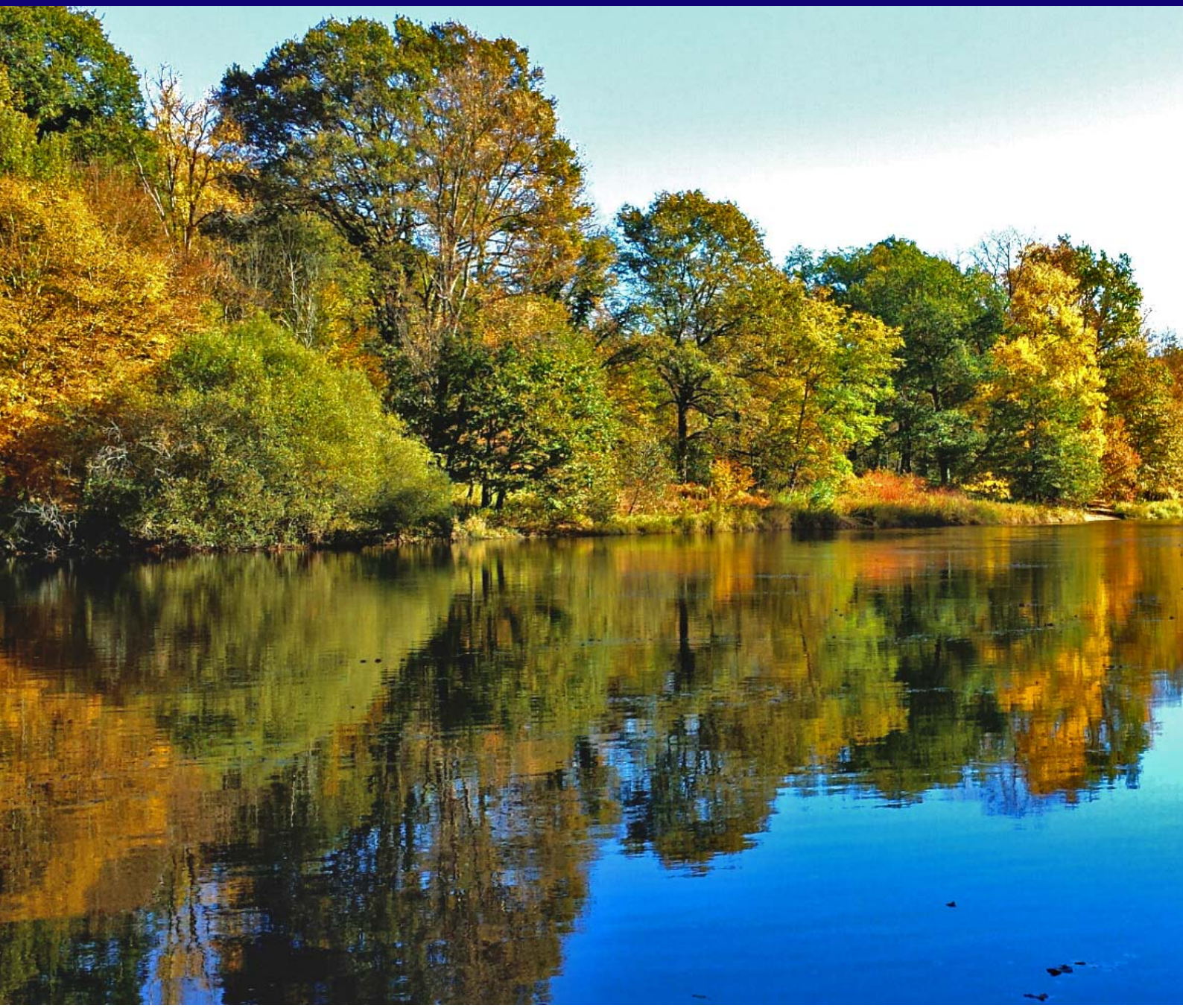
Suivi des habitats du saumon atlantique et de leur fonctionnalité sur le bassin de la Garonne

Année 2019

M. Coll ; G. Durbe ; A. Nars ; S. Bosc



MIGADO

FÉDÉRATION DÉPARTEMENTALE PÊCHE 31

RESUME

Suivi des habitats du saumon atlantique et de leur fonctionnalité sur le bassin de la Garonne

Objectifs de l'action :

- **Suivi de la fonctionnalité des milieux et évaluation du colmatage du substrat des frayères**
- **Mise à jour des cartographies des frayères et des zones de grossissement potentielles sur l'Ariège**
- **Suivi thermique de la Garonne et des affluents sur le haut bassin**

Chiffres clés

Fonctionnalité des frayères

Pour la saison de reproduction 2018-19, 5 stations sur la Garonne, 2 sur la Pique et 5 sur la Neste.

Cartographie des habitats

60,4 km parcourus sur l'Ariège entre le barrage de Labarre et Auterive.

36,5 ha de surface d'Equivalents Radiers-Rapides

Production potentielle de **18 259 à 36 519 smolts** sur le secteur suivi

19 zones de frayères potentielles recensées (**0,34 ha)**

Suivi thermique

Enregistrements horaires sur des cycles annuels complets

18 stations réparties entre les affluents amont et la Garonne jusqu'à Golfech

- **2** sur la Pique
- **2** sur la Neste
- **5** sur l'Ariège
- **9** sur la Garonne

Contexte de l'année

Les conditions hydrologiques rencontrées à l'occasion des suivis de 2019 ont été relativement faibles.

Les deux campagnes de suivi de la fonctionnalité des habitats de reproduction (pré et post reproduction) ont pu être réalisées dans de bonnes conditions, et ce sur l'ensemble des stations habituellement suivies.

De même, les faibles débits enregistrés sur l'Ariège ont permis un bon déroulement de la campagne de cartographie des faciès d'écoulement et des zones potentielles de frayères (ZPF).

Bilan et perspectives

Frayères

Les suivis dressent un état de référence sur la Garonne et la Pique concluant à l'amélioration des conditions hydro sédimentaires amorcées par la crue 2013. Cette amélioration semble se maintenir par la mise en place de nouvelles modalités de gestion du transport solide au niveau des ouvrages. Les mesures réalisées sur la Neste d'Aure montrent une certaine hétérogénéité entre les stations en termes de conductivité mais également en proportion d'infiltration. Cette forte variabilité des paramètres suivis se retrouve entre les années mais également au cours d'une même saison de reproduction.

Cartographie

Les surfaces de radiers, faciès favorables à la croissance des juvéniles, sont inférieures de 8,1 ha par rapport à celles mesurées en 2014 (entre Labarre et Pamiers).

Les surfaces de ZPF inventoriées sont relativement faibles, et représentent 0,13 % de la surface totale du linéaire suivi.

Enfin, les zones de refuge pour les individus adultes semblent abondantes et régulièrement réparties sur le linéaire étudié.

Thermie

Cette année, le nombre de sondes par station suivie a été porté à 2 afin de limiter la perte de données constatée sur les années précédentes.

Bien que des travaux aient été réalisés sur la Garonne à Saint Béat ainsi qu'à la station de Carbonne, des chroniques complètes ont pu être enregistrées pour toutes les autres stations.

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,
- La Fédération Nationale de la Pêche en France.

Equipe de travail MIGADO :

Chargé de missions : Stéphane BOSC

Techniciens : Marie COLL, Alexandre NARS

Secrétariat édition : Marie Pierre CAPRINI

Dans le cadre du suivi de la qualité des substrats de frayères sur le bassin de la Garonne amont, réalisée en partenariat avec la Fédération de Pêche de la Haute Garonne, nous remercions également :

- L'AFB DIRSO Toulouse, et en particulier M. Francis GAYOU, pour son appui technique et son aide dans l'analyse des données recueillies,
- La Fédération Départementale de pêche des Hautes-Pyrénées pour sa participation à la collecte des données sur la Neste d'Aure,
- L'Unité de Production Sud-Ouest d'EDF et le Groupement d'Usine de Luchon et en particulier Messieurs Pascal GRABETTE et Nicolas TOUSSET du service Eau et territoire ;

Equipe de travail de la Fédération de Pêche de la Haute Garonne :

Directeur : Olivier PLASSERAUD

Chargé de missions : Gaël DURBE

SUIVI DES HABITATS DU SAUMON ATLANTIQUE ET DE LEUR FONCTIONNALITE SUR LE BASSIN DE LA GARONNE

MPHASA19

Dans le cadre du plan de restauration du saumon atlantique, MIGADO réalise le suivi des habitats de croissance et de reproduction de cette espèce sur la Garonne. Cette action se décline en 3 volets :

1er volet : Suivi de la qualité du substrat des frayères de salmonidés sur le bassin de la Garonne amont.

Cette opération consiste en une évaluation du degré de colmatage des zones de frayères potentielles et actives de salmonidés par des mesures de conductivité hydraulique. Ce suivi, initié en 2014 sur la Garonne et étendu ensuite sur l'ensemble des cours d'eau du bassin susceptibles d'être colonisés par les saumons, constitue une banque de données sur l'évolution des habitats de ces secteurs.

2ème volet : Mise à jour de la cartographie des habitats favorables au saumon atlantique et estimation de la capacité d'accueil en juvéniles.

Réalisée pendant la période d'étiage estival 2019, la cartographie des habitats consiste en un parcours à pied de l'ensemble du linéaire afin d'effectuer une description des différents faciès d'écoulement et de leur superficie. Ces relevés font suite à ceux réalisés en 2014 et portent sur le linéaire de l'Ariège compris entre le barrage de Labarre et la restitution de l'usine d'Auterive.

3ème volet : Suivi du régime thermique Garonne-Pique-Neste d'Aure-Ariège

Le suivi thermique de la Garonne initié en 2000 permet de disposer d'une vision globale de l'évolution de la température de l'eau et d'appréhender le gradient amont aval de ce paramètre.

VOLET 1 : SUIVI DE LA QUALITE DU SUBSTRAT DES FRAYERES DE SALMONIDES SUR LE BASSIN DE LA GARONNE AMONT

SOMMAIRE

SOMMAIRE ..... **II**

LISTE DES ILLUSTRATIONS ..... **III**

INTRODUCTION **1**

1.1 CONTEXTE GENERAL 1
1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE 1
1.3 SECTEURS D'ETUDE 2

MATERIEL ET METHODE **3**

1.4 SUIVI INTERANNUEL 3
1.4.1 Protocole d'évaluation du colmatage des zones potentielles de frayères 3
1.4.2 Cours d'eau concernés et localisation des stations 7
1.4.3 Calendrier d'échantillonnage 8
1.4.4 Contexte hydrologique 10
1.4.5 Traitement des données 12

RESULTATS **14**

1.5 CAS DE LA GARONNE 14
1.5.1 Composition granulométrique de surface 14
1.5.2 Proportions d'infiltration 18
1.5.3 Variations interannuelles de la conductivité hydraulique 20
1.5.4 Retour d'expérience sur les suivis réalisés sur la Garonne de 2015 à 2019 22
1.6 CAS DE LA PIQUE 28
1.6.1 Composition granulométrique de surface 28
1.6.2 Variations interannuelles de la proportion d'infiltration 29
1.6.3 Variations interannuelles de la conductivité hydraulique 30
1.7 CAS DE LA NESTE D'AURE 32
1.7.1 Proportions d'infiltration 32
1.7.2 Conductivité hydraulique 33
1.7.3 Composition granulométrique de surface 35

BILAN ET PERSPECTIVES **37**

BIBLIOGRAPHIE **39**

ANNEXES **42**

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : (A) Matériel utilisé et (B) dimensions du mini-piézomètre (*Datry, 2011*) 3
Figure 2 : Schéma de localisation et de structure d'une frayère de salmonidés (*source : Dupont E. in Motte G., 2005*) 2
Figure 3 : Exemple de dispositions des points de mesure sur une zone d'échantillonnage 4
Figure 4 : Schéma récapitulatif du dispositif expérimental et des mesures réalisées pour chaque point d'échantillonnage 6
Figure 5 : Localisation des stations suivies 8
Figure 6 : Evolution des débits journaliers moyens déversés au Plan d'Arem et à Cierp (source : EDF) 11
Figure 7 : Evolution des débits journaliers moyens enregistrés sur la Garonne à Saint-Béat de janvier 2018 à avril 2019 (source : Banque Hydro) 11
Figure 8 : Evolution des débits journaliers moyens de la Neste d'Aure (source : CACG) 12
Figure 9 : Description et lecture d'un graphique de type box-plot 13
Figure 10 : Evolution de la composition granulométrique de surface des stations suivies sur la Garonne de novembre 2015 à février 2019 17
Figure 11 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2015 à 2018 sur la Garonne 19
Figure 12 : Evolution des proportions d'infiltration entre novembre 2015 et février 2017 sur la Garonne 20
Figure 13 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) mesurée en début de période de reproduction sur la Garonne de 2015 à 2019 22
Figure 14 : Schéma « en Duo » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayères 23
Figure 15 : Schéma dit « en Pyramide » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayères 23
Figure 16 : Schéma dit « en Duo disjoint » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayère – contexte de recharge massive par ouverture de vannes de fond (cas Garonne – plan d'Arem) 24
Figure 17 : Autre schéma dit en « Duo disjoint » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayère – contexte d'altération par pavage (érosion /colmatage) 24
Figure 18 : Représentation théorique des phases d'érosion et de recharge dans le tronçon court circuité, lors d'une crue annuelle au niveau du plan d'Arem. En bleu, le débit entrant dans le plan d'Arem (bleu) et (rouge) déversé dans le tronçon court-circuité. Les phases d'érosions sont hachurées en rouge et les phases de recharge en vert. La partie rouge et verte matérialise le chevauchement entre les phases de recharges (crue > 70 m^3/s) et la phase d'érosion (crue < 70 m^3/s) 27
Figure 19 : Evolution de la composition granulométrique de surface des stations suivies sur la Pique de novembre 2015 à février 2019 29
Figure 20 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2014 à 2018 sur la Pique 30
Figure 21 : Evolution de la conductivité hydraulique depuis novembre 2015 sur l'ensemble des stations suivies sur la Pique 31
Figure 22 : Synthèse des données de proportion d'infiltration calculées dans le cas de la Neste d'Aure depuis novembre 2016 32
Figure 23 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) depuis novembre 2016 sur la Neste d'Aure 34
Figure 24 : Evolution de la composition granulométrique de surface des stations suivies sur la Neste de novembre 2016 à février 2019 36

TABLEAUX :

Tableau 1 : Synthèse bibliographique des caractéristiques des habitats de reproduction du saumon atlantique (Salmo salar) et de la truite fario (Salmo trutta) 3
Tableau 2 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989) 5
Tableau 3 : Chronique d'échantillonnage des stations du réseau de suivi Garonne-Pique-Neste de 2014 à 2019 (*données non acquises, forte hydrologie) 9

ANNEXES :

Annexe 1 : Exemple de fiche terrain pour les relevés de conductivité hydraulique 43
Annexe 2 : Bilan des valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur la Garonne depuis novembre 2015 44
Annexe 3 : Bilan des valeurs de conductivité hydraulique (K) mesurées depuis novembre 2016 sur la Neste d'Aure 45
Annexe 4 : Evolution des conductivités hydrauliques moyennes et des proportions d'infiltration mesurées sur la Neste d'Aure depuis novembre 2016 46

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 ont souhaité 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 aux rapports annuels édités entre 2015, 2017 et 2018, qui traitaient de l'applicabilité de ce protocole au cas des frayères à salmonidés et dressaient un bilan interannuel de l'évolution de la qualité des habitats de reproduction sur la Garonne et la Pique (Coll et *al.*, 2015 à 2018).

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 données sur la Garonne, la Pique et la Neste afin de :

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

(2) 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.

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 ;
- La Neste d'Aure : en amont de la confluence avec la Neste du Louron jusqu'à la confluence avec la Garonne.

Les secteurs concernés par le suivi du colmatage sont largement impactés par les ouvrages hydroélectriques. Le fonctionnement de la chaine 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 chaine hydroélectrique fonctionnant également par éclusées (centrales du Portillon, de la Pique supérieure, de la Pique inférieure et du lac d'Oô). La Neste d'Aure se trouve aussi dans un contexte hydrologique très impacté par la présence de nombreuses installations hydroélectriques et de la prise d'eau du canal de la Neste à Sarrancolin.

MATERIEL ET METHODE

1.4 Suivi interannuel

1.4.1 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-crue 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.

1.4.1.1 Matériel utilisé

Chaque équipe de terrain doit disposer de :

- 1 mini-piézomètre
- 1 tige métallique peinte en noir mat
- 1 tube PVC gradué
- craies
- chiffons
- 2 têtes de frappe
- 1 masse
- 1 entonnoir d'1 L
- 1 bécher d'1 L
- 1 chronomètre
- 1 décamètre
- Téflon

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.

(A) **(B)**

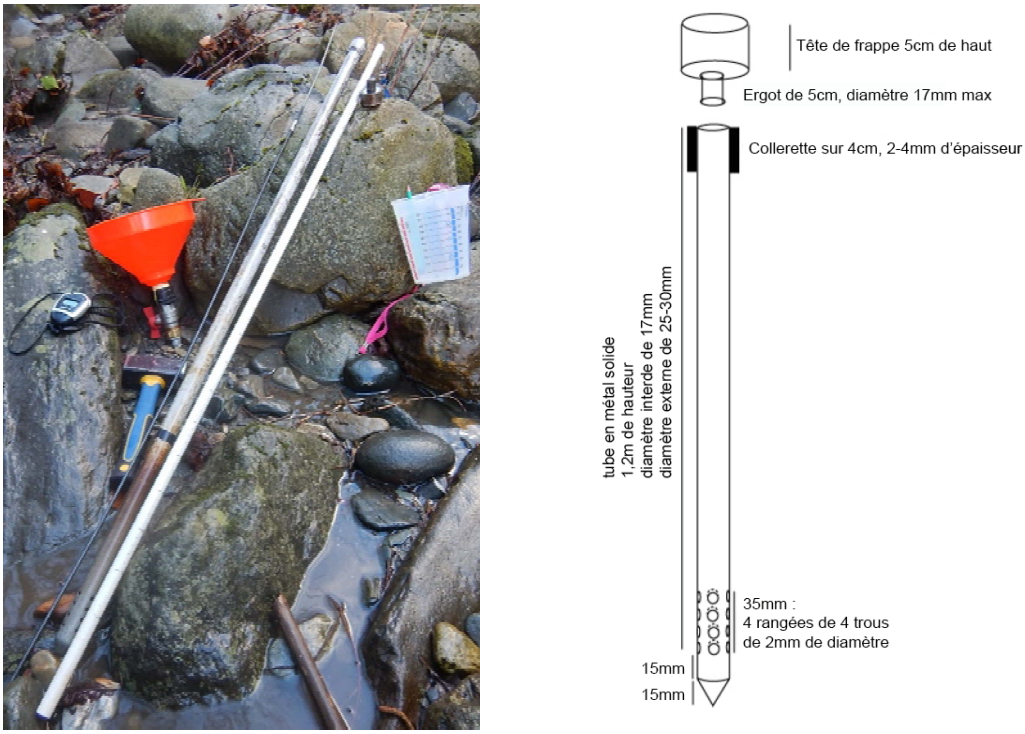


Figure 1 : (A) Matériel utilisé et (B) dimensions du mini-piézomètre (*Datry, 2011*)

1.4.1.2 Mise en œuvre

1.4.1.2.1 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 potentielles de frayères (ZPF). 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 (Bardonnet et Baglinière, 2000 ; Crips, 1996 ; Gaudemar et *al.*, 2000 ; Gibson, 1993).

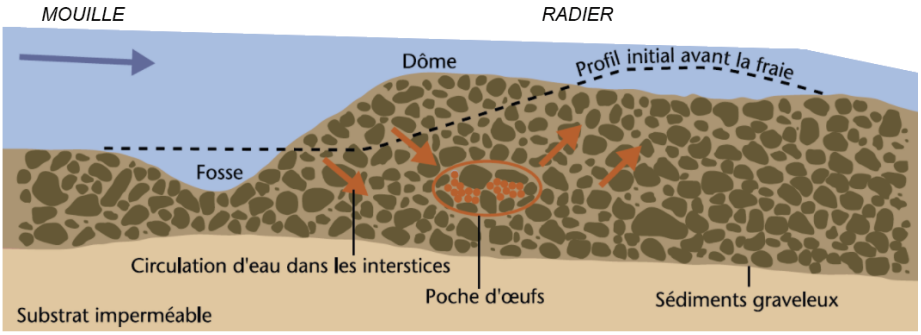


Figure 2 : Schéma de localisation et de structure d'une frayère de salmonidés (*source : Dupont E. in Motte G., 2005*)

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

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

1.4.1.3 Positionnement des points

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.

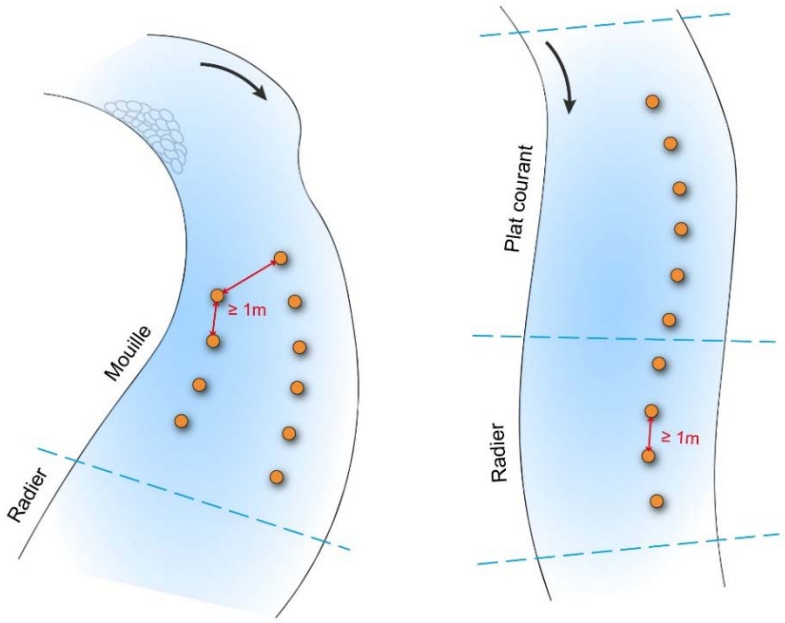


Figure 3 : Exemple de dispositions des points de mesure sur une zone d'échantillonnage

1.4.1.4 Mesures de conductivité hydraulique

Pour chaque point de mesure :

- **<u>Enfoncer le mini-piézomètre</u>** 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).

- **<u>Mesurer ou relever les paramètres suivants</u> :**
  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 bécher 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.

1.4.1.5 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.

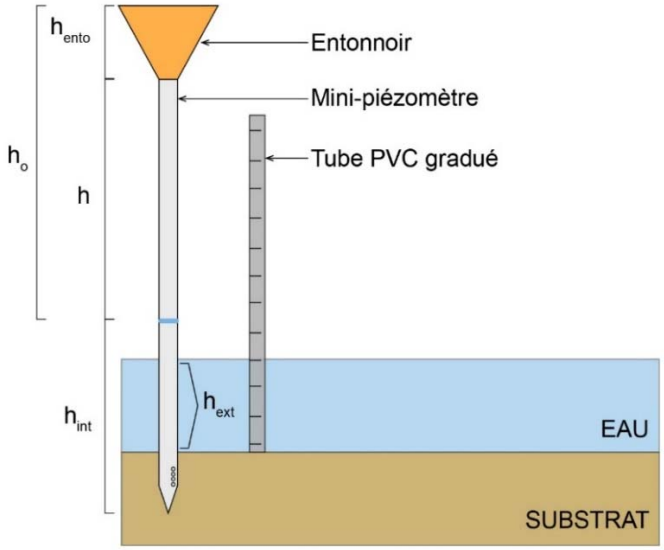


Figure 4 : Schéma récapitulatif du dispositif expérimental et des mesures réalisées pour chaque point d'échantillonnage

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 : $h = h_{piézo} - h_{int}$
- ho, la hauteur de la colonne d'air depuis l'entonnoir, telle que : $ho = h + h_{ento}$

A partir des données recueillies sur le terrain (**hint, hext** et **Dt**), il est alors possible de déduire différents paramètres (**h** et **h0**) utiles au calcul de la conductivité hydraulique (notée **K**, en cm/h) selon la formule suivante :

$$K = \frac{(0{,}2501 * Dpiézo)}{Dt} * \ln(\frac{ho}{h})$$

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 :

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

1.4.2 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 concernait jusqu'alors :

- 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,
- 6 stations sur la Neste d'Aure (de l'amont vers l'aval) : Cadéac, Camous, Escalère, Rebouc, Lortet, Izaux.

Depuis 2018, des mesures supplémentaires ont été réalisées au niveau de la base de loisirs d'Agos (Vieille Aure). Aussi, la station de Camous, très proche de celle d'Escalère, a été abandonnée pour des raisons de modification de faciès (augmentation de la profondeur).

La localisation des stations ainsi que leur position vis-à-vis des principaux ouvrages hydro-électriques sont présentées dans la Figure 5.

Notons que les stations en aval proche du plan d'Arem, Luret, Gorges, Camous et Escalère sont des stations localisées dans des tronçons court-circuités et donc soumises aux débits réservés d'aménagements hydroélectriques. Les stations de la Neste, en aval de Sarrancolin (Rebouc, Lortet et Izaux), sont soumises au débit réservé du canal de la Neste. Les autres stations sont potentiellement soumises aux éclusées provenant des usines hydroélectriques localisées en amont.

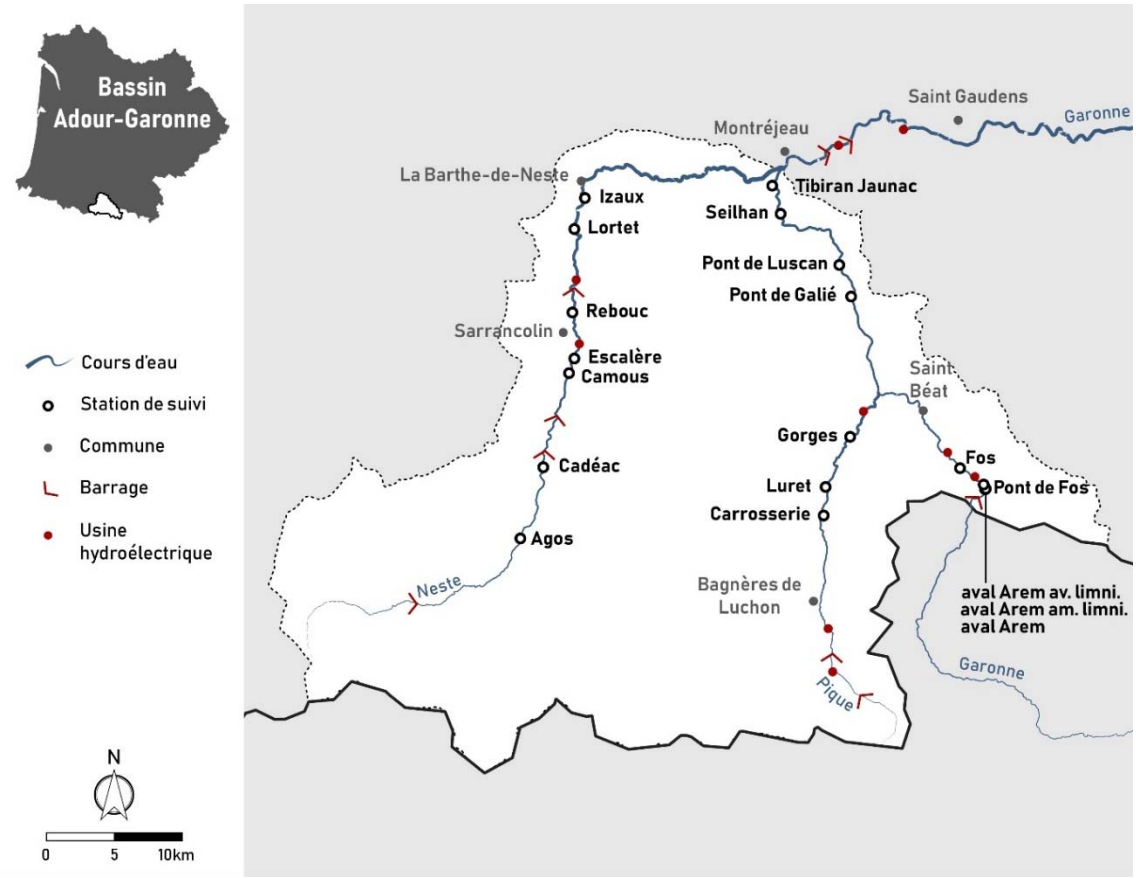


Figure 5 : Localisation des stations suivies

1.4.3 Calendrier d'échantillonnage

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.

Lors de cette saison de ponte, les débits observés sur la période de suivi ont permis la réalisation des deux campagnes de terrain, en novembre 2018 et février 2019, dans de bonnes conditions et ce, sur l'ensemble des stations.

L'ensemble du planning d'échantillonnage sur la Garonne amont, la Pique et la Neste est synthétisé dans le Tableau 3 ci-dessous.

Cours d'eau	Stations	2014-15 Phase d'essai		2015-16		2016-17		2017	2017-18		2018-19	
		Sessions										
		S 1	S 2	S 1	S 2	S 1	S 2	Juillet	S 1	*S 2	S1	S2
Garonne	Aval plan d'Arem	-	-	10	10	10	10	10	10	-	10	10
	Aval Arem amont limni.	-	-	-	-	-	-	-	10	-		
	Aval Arem aval limni.	-	-	-	-	-	-	-	10	-		
	Amont pont de Fos	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	
	Aval Fos	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	
	Pont de Galié	-	10	10	10	10	10	10	10	-	10	10
	Pont de Luscan	-	10	10	10	10	10	10	10	-	10	10
	Seilhan	-	-	10	10	10	10	10	10	-	10	10
	Tibiran-Jaunac	-	-	10	10	10	10	10	10	-	10	10
Pique	Carrosserie	10	10	10	10	10	10	-	10	-	10	10
	Luret	10	10	10	10	10	10	-	-	-	-	-
	Gorges	-	10	10	10	10	10	-	10	-	10	10
Neste	Agos	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	10
	Cadéac	-	-	-	-	10	10	-	10	-	7	10
	Camous	-	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-
	Escalère	-	-	-	-	10	10	-	10	-	10	10
	Rebouc	-	-	-	-	10	10	-	10	-	6	-
	Lortet	-	-	-	-	10	10	-	10	-	10	10
	Izaux	-	-	-	-	10	10	-	10	-	10	10

Tableau 3 : Chronique d'échantillonnage des stations du réseau de suivi Garonne-Pique-Neste de 2014 à 2019 (*données non acquises, forte hydrologie)

Remarques :

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 des positions 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.

1.4.4 Contexte hydrologique

La Figure 6 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 moyens journaliers présentés ici sont ceux déversés depuis le Plan d'Arem sur la Garonne et depuis la prise d'eau de l'usine de Cierp à Cier-de-Luchon sur la Pique (source : EDF). Les débits réservés ne sont pas pris en compte, seules les variations des débits engendrées par le fonctionnement des ouvrages hydroélectriques sont présentées.

Ces données détaillées de débits déversés n'étant disponibles que jusqu'à août 2018, le contexte hydrologique des relevés de la saison 2018-19 est présenté à partir de débits moyens journaliers de la Garonne enregistrés à Saint-Béat (Figure 7, source : Banque Hydro).

Notons que les forts débits enregistrés en février 2018 n'avaient pas permis la réalisation de la deuxième session de mesures de conductivité de la saison 2017-18.

Plusieurs éléments peuvent être notés concernant l'hydrologie correspondant aux mesures de terrain. En Garonne, le tronçon court-circuité en aval du Plan d'Arem semble être soumis à des déversements relativement fréquents et d'amplitudes variables, pouvant atteindre les 49 m^3/s (moyenne journalière) sur la période concernée par les relevés. On notera également la forte augmentation des débits déversés en mai 2016 (max de 49 m^3/s de moyenne journalière) et 2017 (max de 30 m^3/s de moyenne journalière).

Dans des proportions moins importantes mais sur une période beaucoup plus longue, lors des automnes 2016 et 2017, des déversements ont fait passer les débits dans le TCC de 2 m^3/s à des valeurs comprises entre 5 à 10 m $^3/s$ pendant 1 à 2 mois.

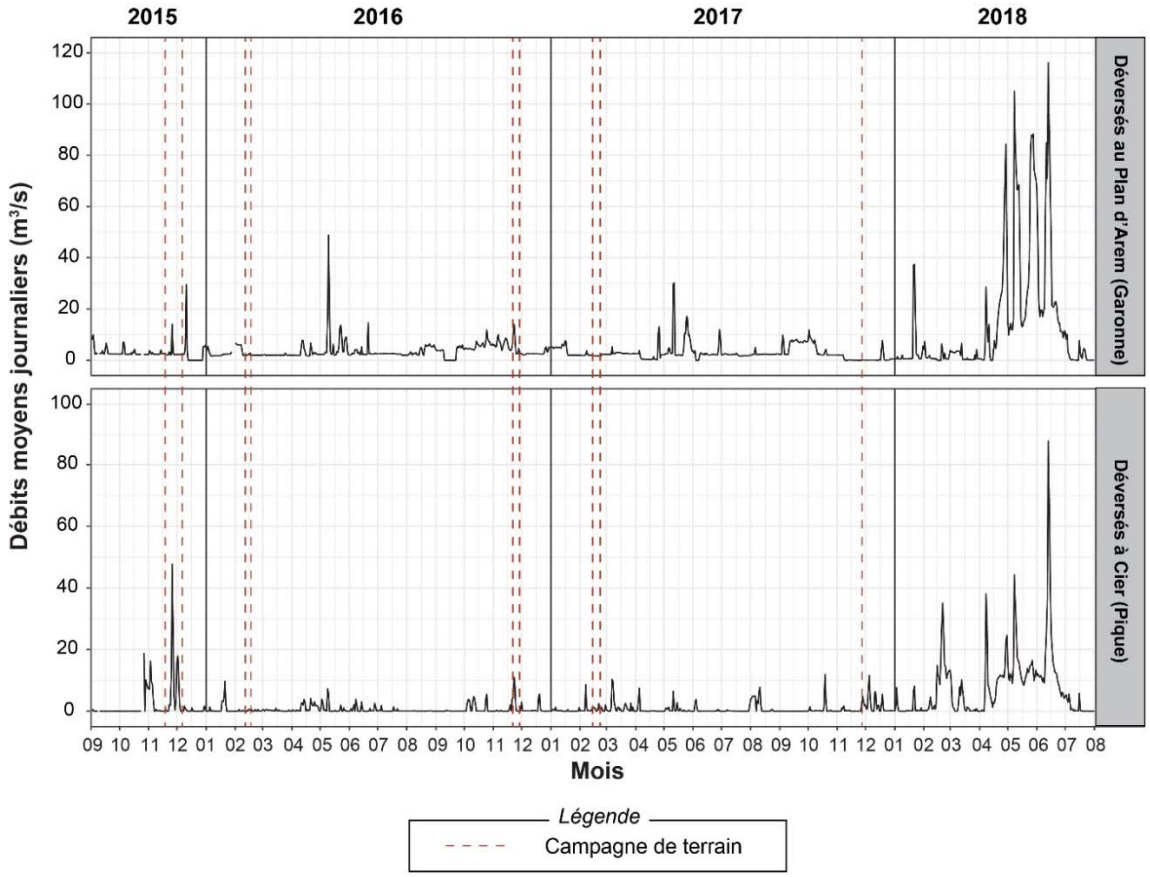


Figure 6 : Evolution des débits journaliers moyens déversés au Plan d'Arem et à Cierp (*source : EDF*)

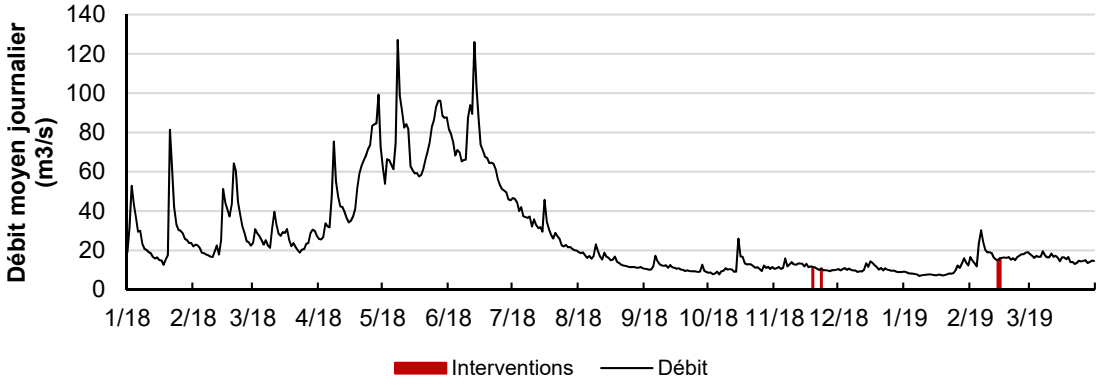


Figure 7 : Evolution des débits journaliers moyens enregistrés sur la Garonne à Saint-Béat de janvier 2018 à avril 2019 (source : Banque Hydro)

La Figure 8 présente les débits mensuels moyens enregistrés sur la Neste en aval de Sarrancolin depuis 2016, et précise les périodes de mesures de la conductivité hydraulique. Les mesures se réalisent classiquement pendant des périodes d'étiage hivernal, avec des débits moyens inférieurs à 10 m^3/s sur la Neste pour ce secteur. Notons également

l'augmentation des débits au printemps, caractéristique du régime hydrologique de ce cours d'eau.

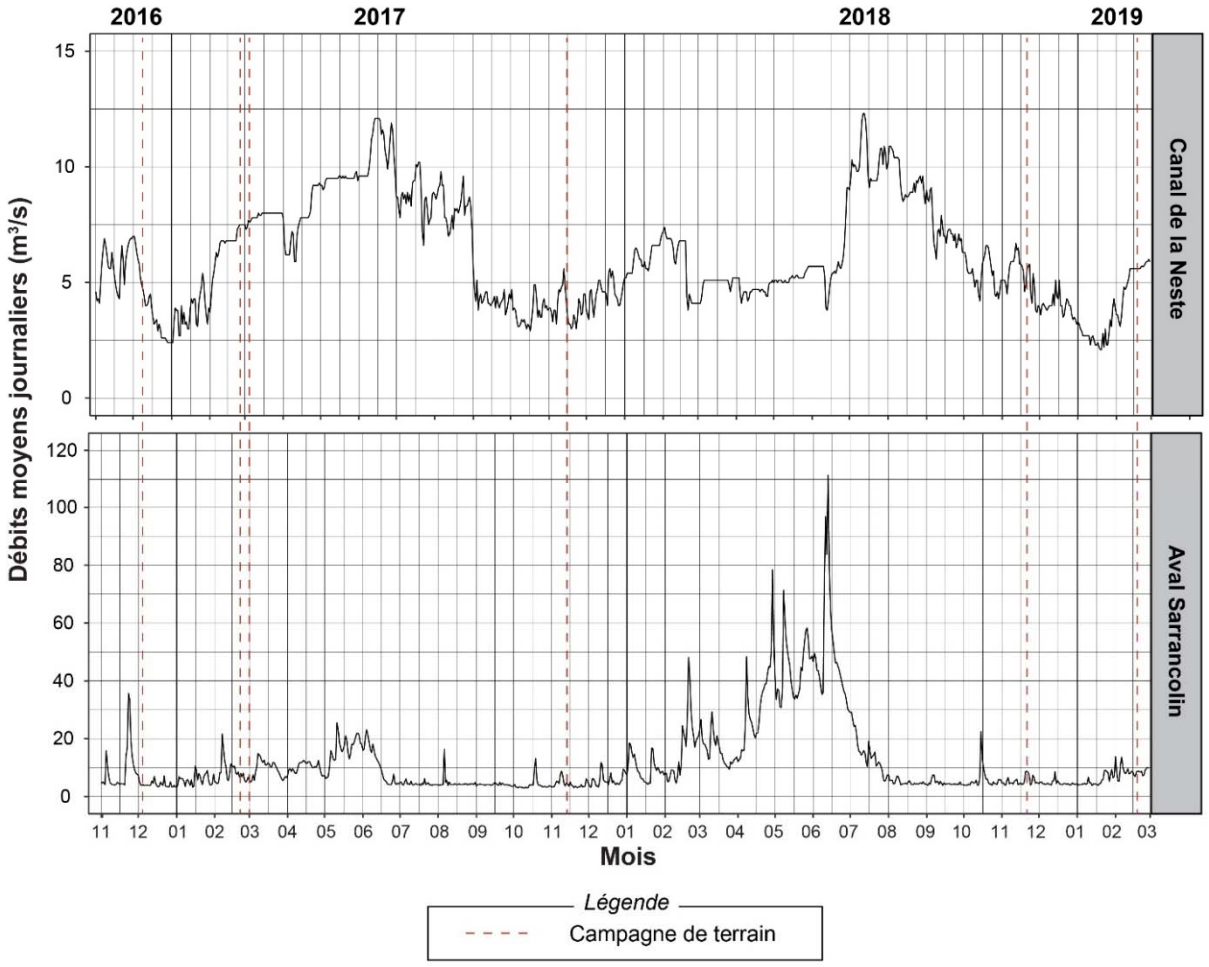


Figure 8 : Evolution des débits journaliers moyens de la Neste d'Aure (source : CACG)

1.4.5 Traitement des données

1.4.5.1 Paramètres calculés

Dans un premier temps, la conductivité hydraulique moyenne et la proportion d'infiltration sont calculées pour chaque session de chaque année, et ce pour l'ensemble des stations suivies.

Rappelons que la proportion d'infiltration *P* à l'échelle d'une station est calculée comme suit :

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

1.4.5.2 Description granulométrique

Les résultats du suivi granulométrique sont exprimés, quant à eux, en fréquence de chaque classe granulométrique par station suivie et par campagne de mesures. Les classes granulométriques dominantes et accessoires sont traitées conjointement (soit 20 relevés granulométriques par station et par campagne de mesure).

Par ces graphiques d'occurrence de granulométrie dominante de surfaces sur les 10 points, l'hétérogénéité de la répartition granulométrique de surface est matérialisée à l'échelle de la zone potentielle de frayères. Les stations ont été choisies en fonction de leurs caractéristiques morphologiques qui leur confèrent de grandes surfaces de granulométrie favorable.

1.4.5.3 Analyses descriptives de la conductivité hydraulique

L'ensemble des données de conductivité hydraulique sont présentées sous forme de box-plots dont la signification est rappelée ci-dessous :

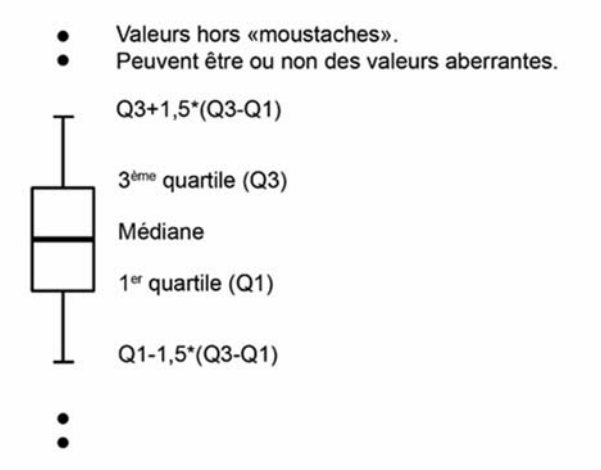


Figure 9 : Description et lecture d'un graphique de type box-plot

Pour des raisons de compréhension, les valeurs moyennes de conductivité hydraulique sont ajoutées (moyenne par station et par campagne de mesures).

Il s'agit ici d'analyser les variations interannuelles de la conductivité hydraulique à l'échelle d'une station, mais aussi entre les stations pour une même année de suivi.

RESULTATS

L'ensemble des données recueillies entre novembre 2014 et février 2019 est illustré en Annexe 2 et Annexe 3.

1.5 Cas de la Garonne

1.5.1 Composition granulométrique de surface

La Figure 10 présente l'évolution de la composition granulométrique de surface, exprimée en pourcentages d'occurrence des classes granulométriques dominantes calculés sur les dix points de mesures de conductivité hydraulique des stations étudiées sur la Garonne depuis le début du suivi (de novembre 2015 à février 2019).

L'analyse qui suit différencie la station Aval d'Arem, très proche du barrage et soumise au débit délivré dans le TCC, des autres stations en plein débit et situées en aval de la confluence avec la Pique sur deux périodes avant et après la campagne estivale de l'été 2017.

Les mesures réalisées sur la station Aval Arem en novembre 2015 (15-16-S1) révèlent un état de référence en termes de matelas alluvial, résultant du contexte hydrologique 2013-2014 particulièrement morphogène. A ce moment du suivi, la zone de frayères était composée de graviers grossiers et cailloux fins présents en proportions similaires (50%/50%) conformément aux répartitions observées dans les cours d'eau dont le transport sédimentaire n'est pas ou peu entravé. Ce schéma de référence montre une répartition de deux granulométries dominantes de classe voisine, que l'on nommera schéma en duo.

Notons qu'un second schéma de répartition des classes granulométriques semble s'observer dans des secteurs fonctionnels présentant un transport solide moins dynamique ou une diversité d'écoulement plus importante à l'échelle de la ZPF. En effet, ces configurations semblent engendrer une plus grande diversité de granulométries entre les 10 points échantillonnés, et donc une distribution en cloche des classes granulométriques.

Sur la station plan d'Arem, entre novembre 2015 et février 2017, la répartition des proportions des classes granulométriques se modifie. On retrouve une granulométrie de surface plus diversifiée bien qu'essentiellement grossière (pierres fines à pierres grossières) voire fine (sables grossiers). Ceci pourrait s'expliquer par des fluctuations de l'hydrologie en aval du barrage et donc une intermittence des restitutions des sédiments stockés dans ce dernier. Ces perturbations sont liées au fonctionnement de l'ouvrage et aux éclusées quotidiennes ; les surverses au barrage entraînent de manière concomitante une érosion progressive des stocks de granulométrie intermédiaire, laissant apparaître une sous-couche de pierres fines, et un recouvrement de matériaux plus fins, mélange de graviers et de sables. On obtient ainsi un schéma de répartition en deux classes dominantes disjointes avec une composition sableuse accessoire mais significative en février 2017 (16-17-S2). Dans ce schéma de distribution granulométrique, plus l'écartement entre les deux classes principales est important, plus le déficit en matériaux est marqué, avec une granulométrie grossière héritée de la sous-couche. Ces matériaux grossiers sont généralement colorés par le recouvrement de biofilm ; indicateur de leur immobilité. La phase la plus petite des deux est souvent la partie mobile déficitaire ne recouvrant plus la totalité de la sous-couche. Sur une année d'hydrologie moyenne, cette fraction, très mobile, peut être renouvelée plusieurs fois lors des ouvertures de vannes du barrage en consigne de crue.

Pour les autres stations en aval de la confluence avec la Pique, entre 2015 et février 2017, les schémas de répartition des granulométries de surface sont, dans la plupart des cas, plus stables avec le maintien d'un schéma de répartition en duo ou en pyramide.

La Pique, plus fonctionnelle sur le plan du transport solide, apporte à la Garonne une part de ses sédiments et limite ainsi l'érosion de son substrat. La faible mobilité des matériaux des secteurs Garonne aval peut favoriser leur colmatage. Dans ces secteurs, l'érosion semble aussi limitée du fait d'une pente moins forte et d'un lit moins contraint.

En été et novembre 2017, la représentativité des classes granulométriques favorables augmente significativement au niveau de la station plan d'Arem. Une recharge de l'ensemble de la largeur du lit par une couche importante de sédiments favorables, très certainement liée à l'ouverture des vannes du barrage lors des crues de printemps, a pu être observée sur la station lors de la prise des mesures de conductivité.

La répartition granulométrique reste relativement stable avec deux granulométries dominantes de cailloux grossiers à 50 % et graviers fins à 45 % en été 2017 et de 55 % de cailloux grossiers et 40 % de graviers fins en novembre 2017.

Ce schéma de répartition avec deux granulométries dominantes disjointes résulte de recharges ponctuelles et massives lors des ouvertures des vannes du barrage. L'altération de cet état le reste de l'année semble se traduire par l'apparition progressive d'autres granulométries dominantes, pouvant refléter les phénomènes d'érosion des graviers et des cailloux accompagnés de dépôt fins de sables.

Concernant les observations de novembre 2018 en aval du plan d'Arem, il semblerait que les crues morphogènes du printemps précédent et l'application des consignes de crues dans la gestion du barrage aient permis une restauration de la composition granulométrique de la zone aval du barrage. On observe une répartition intermédiaire entre le type duo et le type pyramide mais la surface favorable est morcelée et beaucoup plus réduite qu'en 2017. Les classes dominantes les plus représentées sont les cailloux fins et les graviers grossiers, avec une proportion moindre de graviers fins et de cailloux grossiers. Lors de la campagne de février 2019, en fin de période d'incubation, nous observons une légère évolution vers un schéma avec deux granulométries dominantes disjointes et quatre granulométries au total composées de 40 % de cailloux fins et 30 % de graviers fins avec 20 % de graviers grossiers et une petite proportion de cailloux grossiers.

Sur cette même période, pour les secteurs en aval de la confluence avec la Pique, la composition granulométrique se modifie de manière plus progressive avec des duos de granulométries voisines. Au pont de Galié et au pont de Luscan, on observe un changement du couple de granulométries dominantes cailloux grossiers/cailloux fins, remplacé par des classes plus grossières telles que des pierres fines/cailloux grossiers.

Lors de l'hiver 18-19, l'apparition de pierres grossières sur la station pont de Galié laisse penser à un phénomène d'érosion progressive, de l'amont vers l'aval des fractions de tailles inférieures à l'échelle du tronçon confluence Pique-confluence Neste dont le front serait situé entre la station de Galié et de Luscan sur laquelle il n'y a pas encore d'apparition de pierres grossières, comme sur la station de Seilhan composée de 50 % de cailloux grossiers et de 50 % de pierres fines. A l'inverse, la station Tibiran-Jaunac qui présentait des classes granulométriques plus grossières entre 2015 et 2017, prend une tendance inverse avec l'apport d'une granulométrie plus fine de cailloux grossiers, de cailloux fins et de graviers grossiers correspondant aux granulométries observées les années précédentes sur les stations en amont.

A retenir :

- La station Plan d'Arem a un comportement différent du groupe de stations de l'aval de la confluence de la Pique avec des granulométries plus fines mais plus variées et plus colmatées par les sables. Cela pourrait s'expliquer par l'irrégularité et l'asynchronisme entre débits liquides et solides, alternant entre des apports de matériaux par bouffées et des surverses n'apportant que du sable colmatant et provoquant l'érosion des granulométries graveleuses fines (cailloux et graviers).

- Les autres stations en aval de plein débit présentent une granulométrie plus grossière composée majoritairement de cailloux grossiers (entre 40 et 50 %) et de pierres fines ou cailloux fins en proportions variables. La répartition de ces fractions est plus conforme aux répartitions naturelles bénéficiant des apports sédimentaires de la Pique, même s'ils sont irréguliers et impactés par les éclusées.

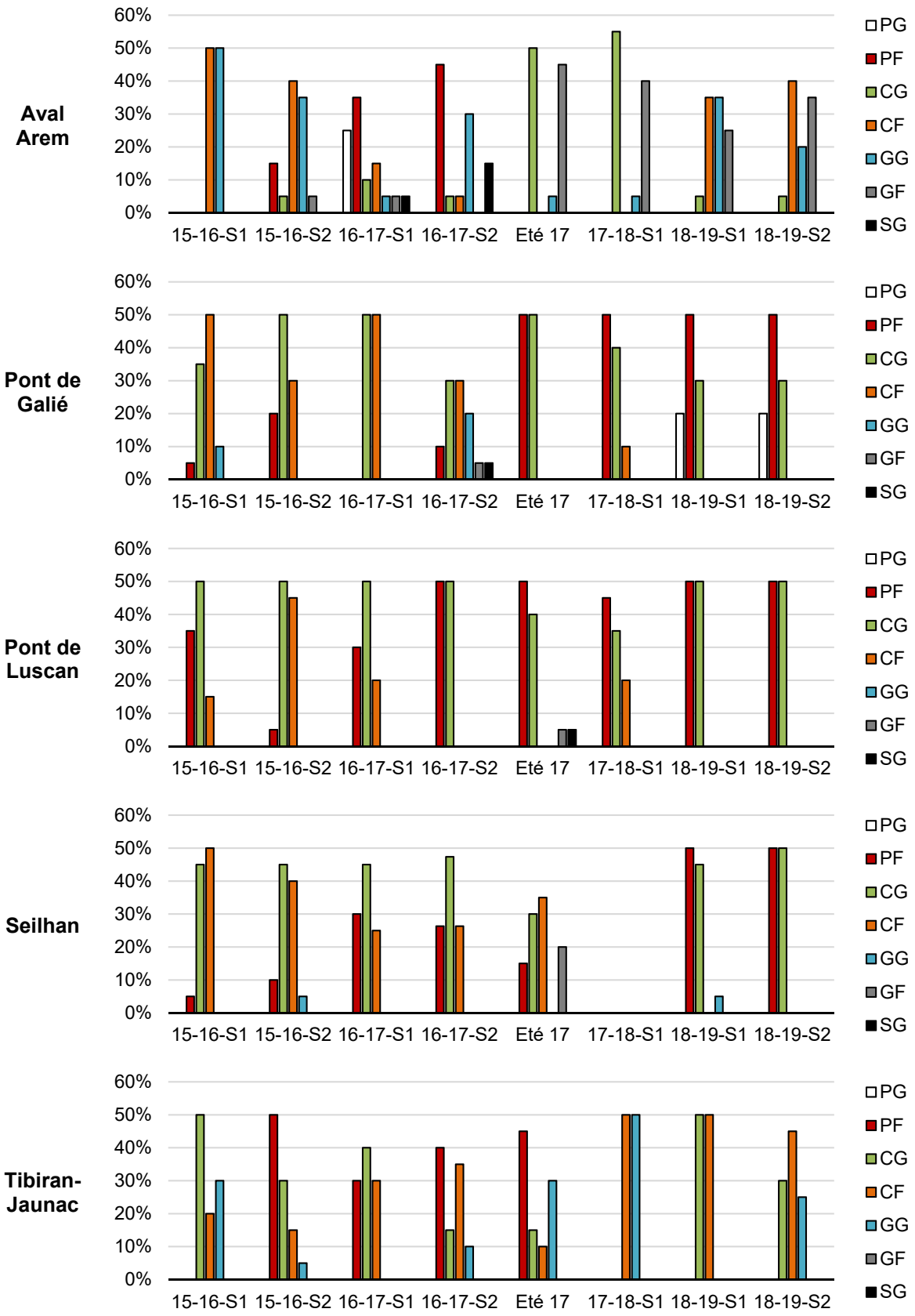


Figure 10 : Evolution de la composition granulométrique de surface des stations suivies sur la Garonne de novembre 2015 à février 2019

1.5.2 Proportions d'infiltration

1.5.2.1 Variations interannuelles

L'analyse des proportions d'infiltration calculées à partir des mesures réalisées lors de la 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 suivis au début de la période de frai.

La Figure 11 présente les valeurs de proportion d'infiltration calculées depuis novembre 2015 sur les cinq stations de suivi.

Dans un premier temps, on notera l'existence d'un schéma de variation spatiale de la proportion d'infiltration. En effet, la proportion d'infiltration est élevée pour les stations les plus en amont (aval Arem et Pont de Galié), tend à diminuer progressivement entre les stations Pont de Galié et Seilhan, puis ré-augmente au niveau de Tibiran-Jaunac et ce, pour l'ensemble des années suivies.

Les valeurs calculées montrent une diminution de la qualité des substrats en début de la période de reproduction 2016. En effet, les proportions d'infiltration diminuent de 0,1 à 0,4 points selon les stations considérées entre novembre 2015 et 2016.

En revanche, il semblerait que les substrats de reproduction disponibles en novembre 2017 aient été de meilleure qualité qu'en 2016, suite à une augmentation globale de la proportion d'infiltration sur les stations suivies (entre +0,2 à 0,3 point selon la station considérée). Ainsi, les stations les plus amont (aval Plan d'Arem et Pont de Galié) présentent une proportion d'infiltration maximale, et les valeurs calculées pour les autres stations suivent toujours le schéma de répartition spatiale décrit plus haut.

En 2018, les débits morphogènes et le transport solide constaté n'ont pas amélioré les mesures de proportion d'infiltration ; les valeurs en début de période de reproduction sont moins bonnes qu'en 2017 (entre 0.7 et 1). Ceci est d'autant plus marqué au niveau de la station de Seilhan qui est en constante dégradation. Cela suggère que les événements hydrologiques du printemps restaurent la perméabilité du substrat qui s'altère ensuite entre la fin du printemps et de l'automne. Les variations de débit ponctuelles lors des éclusées (turbinages) ou prolongées lors des travaux déviant les débits sur le TCC modifient l'hydrologie de base et favorisent les mécanismes d'érosion et de pavage.

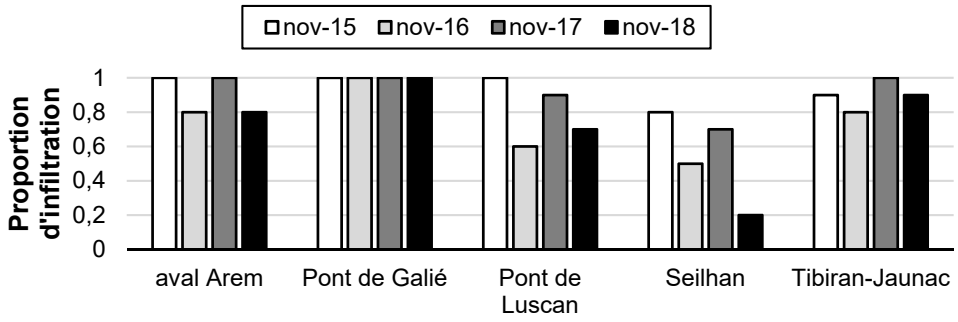


Figure 11 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2015 à 2018 sur la Garonne

1.5.2.2 Chronique complète des mesures réalisées

La Figure 12 présente l'évolution des proportions d'infiltration calculées sur l'ensemble des stations suivies sur la Garonne depuis novembre 2015.

A l'exception de la station Pont de Galié pour laquelle aucune variation n'est détectée, la proportion d'infiltration varie entre le début de la période de reproduction et la période d'incubation des œufs.

Le secteur étudié en aval du Plan d'Arem présente une diminution de la proportion d'infiltration (dégradation de la qualité du substrat) entre les mesures de novembre et février d'une même saison de reproduction (de -0.4 à -0.5 pts), puis une augmentation au cours du printemps. Le phénomène inverse est parfois observable sur les stations plus aval du Pont de Luscan et Tibiran-Jaunac.

Les mesures réalisées en juillet 2017 montrent que la proportion d'infiltration est susceptible de varier entre deux saisons de reproduction. Pour la station en aval du Plan d'Arem, les résultats de cette session s'inscrivent dans une tendance à la récupération de la qualité du substrat. Au printemps 2017, une crue annuelle a permis la recharge d'un stock de sédiments à l'aval immédiat du barrage du Plan d'Arem. Ce stock a probablement été récupéré progressivement durant l'été et l'automne, ce qui expliquerait l'amélioration de la conductivité hydraulique en novembre 2017.

En 2018, les valeurs sont meilleures en début de saison avec des points sans infiltrations symptomatiques d'un contexte de perturbations hydroélectriques. Le colmatage hivernal est plus sévère pour les stations aval qui sont moins pentues, moins dynamiques et bénéficient d'une restructuration des crues printanières moins intensive et régulière que l'ensemble des autres stations. La station Aval d'Arem, impactée par le barrage, subit, elle aussi, de fortes perturbations hivernales.

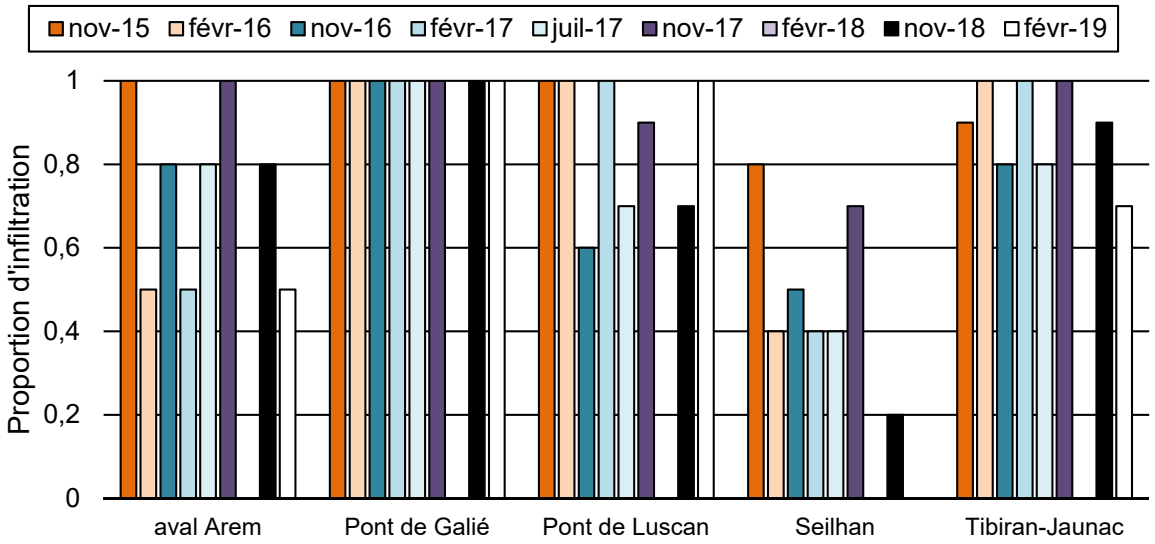


Figure 12 : Evolution des proportions d'infiltration entre novembre 2015 et février 2017 sur la Garonne

1.5.3 Variations interannuelles de la conductivité hydraulique

La Figure 13 illustre l'évolution de la conductivité hydraulique calculée en début de période de reproduction sur les cinq stations suivies depuis novembre 2015.

Les analyses statistiques montraient qu'en novembre 2015, la station aval Arem présentait la conductivité hydraulique moyenne la plus faible par rapport à celles des autres stations suivies (X^2=15, p=4,7*10^{-3}). En effet, la moyenne de cette station était de 8 cm/h contre des moyennes comprises entre 17,5 et 26,8 cm/h selon les stations. Les stations dont la conductivité hydraulique est la plus stable s'approchent des états de référence que nous avions mesurés sur les stations fonctionnelles du bassin versant. Notamment, la station de plan d'Arem qui subit de fortes variations d'apport et donc d'épaisseur de substrat mais qui, par le remaniement fréquent, garde une conductivité hydraulique de début de période de reproduction stable et proche des valeurs fonctionnelles (5-15 cm/h).

Entre l'hiver 2015-16 et 2016-17, on observait une tendance à la diminution de la perméabilité du substrat sur les trois stations amont, statistiquement significative dans le cas de Pont de Luscan (diminution de 17,5 à 4,5 cm/h en un an, W=96, p=5,6*10^{-4}).

Il semblerait que la qualité des substrats s'améliore entre les hivers 2016-17 et 2017-18 comme le montrent les augmentations de perméabilité sur les stations d'aval Arem, Pont de Luscan et Tibiran-Jaunac.

Cependant, la station Pont de Galié présente une réponse différente. Les proportions d'infiltration calculées précédemment indiquent que cette station semble rester fonctionnelle depuis trois ans. En revanche, la perméabilité du substrat diminue progressivement.

Enfin, les valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur la station de Seilhan présentent une forte variabilité et ce, pour chaque année de suivi. Un constat similaire peut d'ailleurs être fait concernant les proportions d'infiltration qui apparaissent incohérentes vis-à-vis des autres stations. Cette station ne subit pas d'apports particuliers et se situe dans un contexte en plein débit sans perturbations. La configuration particulière de cette station vis-à-vis des autres ne permet pas de la comparer. Le suivi a été interrompu sur cette station qui n'est, de plus, pas ou très peu fréquentée par les géniteurs de truite.

Sur la station du Plan d'Arem, les mesures de novembre 2018 sont les plus mauvaises depuis 2015, passant en dessous des valeurs de référence malgré un transfert de sédiments important. Cette situation pourrait s'expliquer par l'action des forts débits naturels (crues) ou anthropiques (éclusées) transitant sans ouvertures des vannes. Ces coups d'eau peuvent éroder et réduire l'épaisseur de la couche sédimentaire favorable à la reproduction. Dans ce cas, l'enfoncement du mini piézomètre à 20 cm va tantôt mesurer le sous écoulement dans la sous-couche pavée colmatée ou dans la couche mobile qui nous intéresse dans le cadre de la reproduction des salmonidés. Ceci explique les mauvaises valeurs ponctuelles qui sont plus induites par un déficit du stock sédimentaire à l'échelle de la station et dont les causes ont déjà été abordées dans les parties précédentes.

Sur les stations en aval, les apports de la Pique et la dynamique du transport solide semblent maintenir une bonne porosité avec des valeurs de conductivité hydraulique satisfaisantes et peu variables, comme sur la station de Galié. Il semble y avoir un gradient de dégradation vers l'aval au vu de l'augmentation de la variance des conductivités hydrauliques à l'échelle de chaque station. Ceci pourrait être symptomatique d'un fort colmatage sur les portions moins pentues et plus sensibles au flux de matières en suspensions généré par l'hydroélectricité du bassin versant.

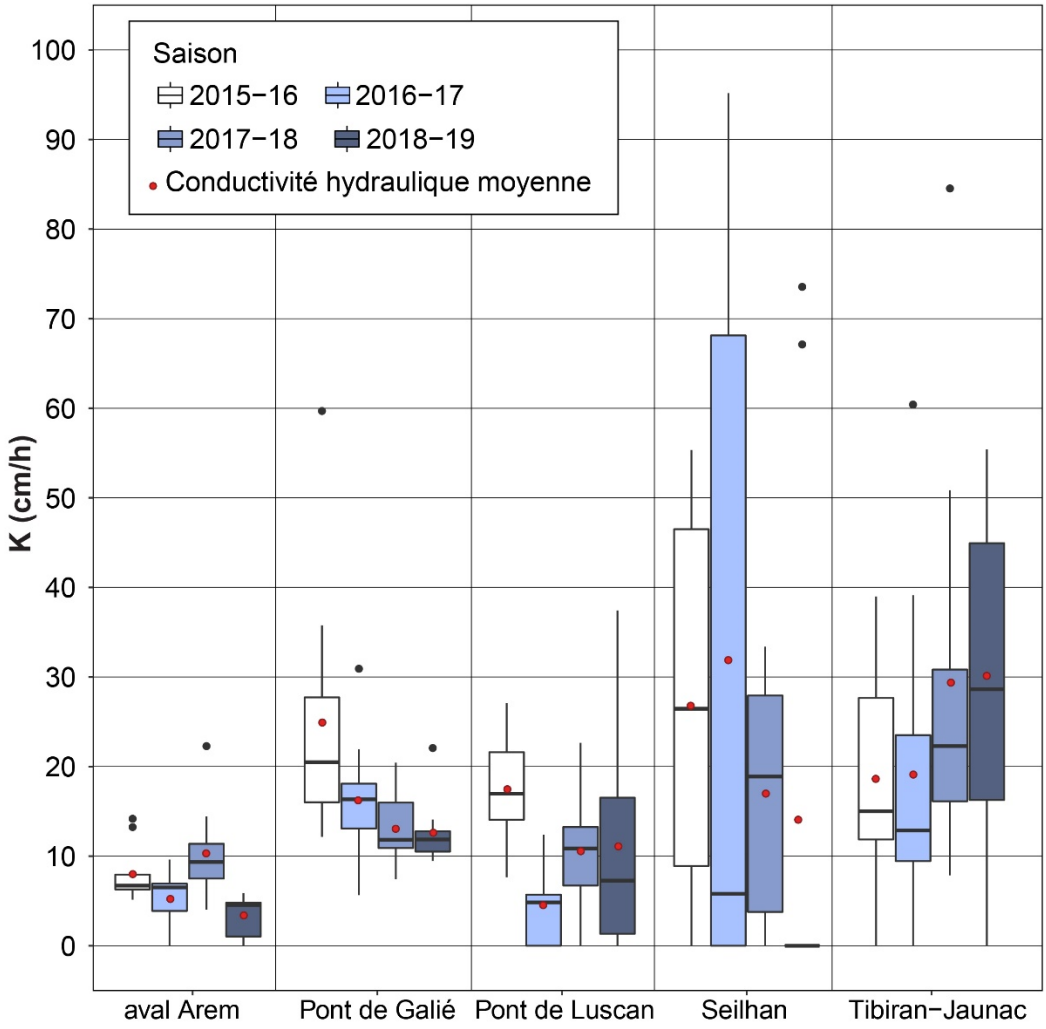


Figure 13 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) mesurée en début de période de reproduction sur la Garonne de 2015 à 2019

1.5.4 Retour d'expérience sur les suivis réalisés sur la Garonne de 2015 à 2019

Durant ces quatre dernières années de suivis, nous avons pu observer des fluctuations de la répartition granulométrique des substrats de la Garonne sur des échelles de temps relativement courtes.

Les observations décrites ci-après ont pu être confirmées lors d'investigations complémentaires, menées notamment par la Fédération de Pêche de la Haute Garonne : suivis par pêches électriques (automne), inventaires de frayères à truite (hiver), suivis par pêches des alevins émergents (printemps) et inventaires des surfaces potentielles de frayères (été).

1.5.4.1 Typologies des schémas de répartition des granulométries dominantes de surfaces :

La méthode de suivi a consisté, pour l'ensemble des stations étudiées et sur chacun des points de mesure de conductivité hydraulique, à réaliser un relevé des granulométries dominantes et accessoires. Lors du traitement des résultats, les proportions de chacune des granulométries présentes sur une zone de fraie ont été classées de la plus grossière à la plus

fine. Cette classification a été ensuite représentée sous forme d'histogramme en bâtons.

Ce travail a permis d'identifier différents schémas de répartition qui semblent se répéter et dont certains correspondent à ceux observables dans les zones fonctionnelles en termes de transport solide.

Ces schémas de répartition des granulométries dominantes de surfaces sur les zones potentielles de frayères sont au nombre de trois : deux types correspondent à des répartitions observées dans des secteurs fonctionnels et un troisième est plutôt caractéristique des zones perturbées sur le plan hydro-sédimentaire.

Le premier schéma dit **« en Duo »** (Figure 14) se compose de seulement deux types de granulométries dominantes majoritaires, voisines, en proportions proches ou égales (ex : CG CF, GG GF,..). Ce schéma peut s'observer dans un contexte de « bon déroulement du transport solide en rythme et en volume », à l'échelle de secteurs sans diversité marquée d'écoulements et permettant un tri granulométrique régulier.

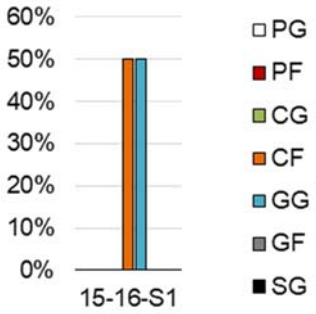


Figure 14 : Schéma « en Duo » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayères

Un deuxième schéma comporte une granulométrie dominante en proportion majoritaire qui va être encadrée par deux ou plusieurs classes granulométriques formant un graphique **« en Cloche »** ou **« en Pyramide »** (Figure 15). Le nombre de classes représentées est positivement corrélé à la diversité d'écoulements, ce qui se traduit par la densité de blocs (< 250 mm) augmentant l'effet de diversification du tri granulométrique sur l'ensemble de la ZPF. Il s'observe aussi lors des premières phases de dégradation du matelas alluvial composé d'un schéma « en Duo ».

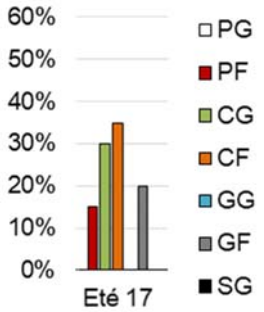


Figure 15 : Schéma dit « en Pyramide » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayères

Un troisième schéma dit en **« Duo disjoint »** est composé de deux granulométries dominantes majoritaires non voisines, éloignées d'une ou de plusieurs classes granulométriques (expl : CG GG, CG GF ...) pouvant être accompagnées de plusieurs autres granulométries dominantes minoritaires reflétant l'hétérogénéité du substrat. Ce dernier type

de répartition peut se rencontrer dans deux contextes :

- sur des stations proches des barrages, lors des recharges massives par ouverture de vanne de fond et lorsque le tri granulométrique n'a pas le temps de se faire sur le continuum. Dans ce cas, le schéma présente une diversité de granulométries, des sables aux cailloux mais leur répartition est homogène, la proportion des granulométries dominantes est donc homogène en tout point. Le duo de granulométries dominantes non voisines n'est accompagné que par de faibles proportions d'autres classes granulométriques. (Figure 16).

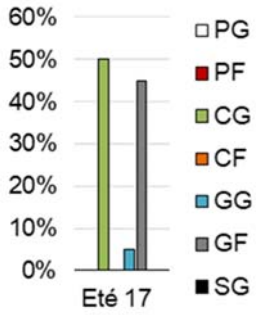


Figure 16 : Schéma dit « en Duo disjoint » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayère – contexte de recharge massive par ouverture de vannes de fond (cas Garonne – plan d'Arem)

- plus classiquement, le second contexte résulte de la dégradation des deux schémas (duo et pyramide) précédents selon des processus d'érosion et de colmatage concomitants. Les variations de débits ne s'accompagnent pas de la diversité des granulométries naturellement transportées par la rivière à cause du stockage des sédiments des barrages ou une injection de débits sans apports sédimentaires par les turbinages (Figure 17).

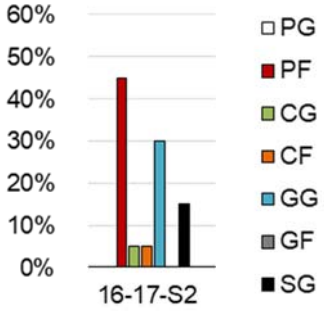


Figure 17 : Autre schéma dit en « Duo disjoint » de la répartition des granulométries dominantes à l'échelle de la zone potentielle de frayère – contexte d'altération par pavage (érosion /colmatage)

Le niveau d'altération à l'état de référence peut s'évaluer par l'écart entre les deux fractions dominantes majoritaires non voisines : plus celui-ci est important, plus le pavage est important. En considérant l'état de nos connaissances sur le substrat de la Garonne pré crue 2013 et sur la nature de la sous couche actuelle, l'association pierres grossières et sables est l'état le plus dégradé qui peut être atteint.

1.5.4.2 L'altération de la qualité du substrat et le bon déroulement du transport solide :

L'altération de la dynamique de transport impacante la qualité et la quantité de substrat sur les ZPF, il est important de préciser la façon dont se déroule cette altération.

L'altération du transport solide est considérée du point de vue du blocage d'un flux qui va entrainer un déficit en aval. Elle se matérialise aussi par l'injection de volumes d'eau dans des rythmes artificiels, dépourvus de la charge et de la diversité de sédiments naturellement associés à l'intensité de la crue.

L'altération du substrat est la résultante des altérations précédemment citées provoquant des mécanismes d'érosion et de colmatage se déroulant lors de fluctuations de débits naturels et anthropiques. Lorsque des débits suffisant pour être morphogènes sont dépourvus de tout ou partie des sédiments qu'ils devraient transporter, un phénomène de compensation entraine l'érosion du substrat. Aussi, les fluctuations de débits trop brutales que subissent les tronçons court-circuités par les barrages et les sections soumises à des éclusées entrainent le dépôt des matières fines sur les mauvais faciès : le colmatage. Le mariage des deux phénomènes induit le pavage.

Les altérations du transport et du substrat s'opèrent selon les différentes contraintes imposées par les installations hydroélectriques du bassin versant :

Les turbinages et éclusées :

Lorsque ces variations de débits sont anthropiques, les turbinages et éclusées provoquent des fluctuations qui sont issues de conduites forcées ou d'ouvertures de vannes hors crues. Ces débits acheminés dans la vallée ne comportent pas la part de charge solide habituellement véhiculée à travers le bassin versant lors des crues naturelles depuis les zones productrices de sédiments de la tête de bassin. Le déficit sédimentaire engendré provoque une érosion des substrats de l'aval.

De plus, ces fluctuations artificielles remanient des matériaux fins et sableux déjà présents qui, lors du tarissement rapide en fin d'évènement, se déposent sur des portions de rivière de granulométrie grossière qui se pavent progressivement (graviers cailloux et pierres). Dans un contexte naturel, les crues de cette ampleur ont une courbe de tarissement plus lente permettant un éclaircissement avant le retour au débit de base. Les matériaux fins se déposent alors sur les bordures (plages) ou dans le fond des pools (profonds) et non sur l'aval des plats courants.

Les barrages de grandes chutes de faibles volumes (cas plan d'Arem):

Lors des crues naturelles infra annuelles et des turbinages, les surverses dans les tronçons court-circuités sont dépourvues de charges grossières piégées dans le barrage. Cela engendre une érosion, une partie des matières fines en suspension passe l'ouvrage et les modalités d'utilisation des débits par les usines hydroélectriques (Fos, Arlos) cumulées avec les turbinages amont font varier anarchiquement les débits dans les TCC. Ces situations amplifient le désordre des dépôts de matériaux dans des secteurs inappropriés induisant un pavage par un couplage érosion colmatage.

1.5.4.3 Altération du tronçon court-circuité par le barrage du Plan D'Arem par alternance de phases d'érosions et de colmatages :

D'après les suivis biologiques réalisés par la Fédération de Pêche de la Haute Garonne, les modalités de gestion du transport solide appliquées sur le plan d'Arem depuis 2014 semblent améliorer fortement le fonctionnement de la reproduction naturelle des truites farios. Malgré cela, les fluctuations de l'épaisseur et de la nature de la couche superficielle mobile laissent craindre une dégradation de cette fonctionnalité. Des années avec des crues annuelles inférieures à 70 m^3/s ou une baisse progressive des volumes de sédiments provenant du bassin espagnol pourraient limiter les possibilités de recharges du tronçon par les vannes du barrage. Ceci annihilerait le mécanisme de restauration printanière des zones

potentielles de frayères par les crues, limitant leur capacité de résilience aux phases d'érosion et de colmatage existant le reste de l'année.

Fonctionnement de restitution des sédiments en cas de crues >70 m^3/s (Fig.18)

Pour une meilleure compréhension de ces phases d'altération, il est important de replacer les phases de surverse et d'ouverture sur un hydro-gramme de crue. Le texte explicatif suivant ne constitue pas une étude précise des modalités de fonctionnement du barrage et du transport solide associé, qui pourraient faire l'objet d'une attention particulière dans les années qui viennent. C'est une approche « schématique » du fonctionnement du barrage de plan d'Arem qui permet d'appréhender les perturbations encore existantes et ce malgré une nette amélioration du transport solide.

Considérons que le fonctionnement des ouvrages hydroélectriques (et notamment les capacités de turbinage) des usines permette de détourner un débit maximum de 35 m^3/s (valeur factice). Cela se traduit en termes de débit transitant dans le tronçon court-circuité par un maintien du débit réservé minimum de 2 m^3/s jusqu'à un débit d'entrée dans le barrage de 37 m^3/s.

A partir de cette valeur, les déversements dans le TCC passent brusquement à 35 m^3/s après l'arrêt de l'alimentation du canal d'amenée de l'usine. Pour tous les débits artificiels et naturels supérieurs à 35 m3/s et jusqu'à 70 m^3/s, le débit au-delà des 35 m^3/s passe dans le TCC par surverse, les vannages sont fermés et le barrage stocke les sédiments. Ces conditions entrainent une érosion du lit du TCC et les matières fines qui y transitent peuvent s'y déposer.

Pour des débits supérieurs à 70 m^3/s dans la Garonne, les vannes du barrage s'ouvrent, une recharge du TCC en matériaux s'opère, avec des dynamiques différentes en fonction du pic de crue (temps et intensité). Lors de la décrue, la fermeture des vannes à 70 m^3/s engendre une phase d'érosion du TCC pendant la courbe de tarissement avec un blocage des sédiments grossiers. Le débit réservé dans le TCC peut être atteint brutalement en cas de reprise des turbinages, avec un dépôt de sables décrit dans la partie précédente.

Pour les débits inférieurs à 70 m^3/s, qui transitent le reste de l'année, on observe aussi des fluctuations des qualités et des surfaces des substrats. Ceci apparait sans crues majeures et parfois même sans fluctuations de débits naturels. Lors des turbinages amont ou des crues de moindre ampleur, le phénomène d'érosion/colmatage se répète avec une phase d'érosion pendant toute la période (phases en rouge sur le schéma de la Figure 18). Cette dynamique explique un pavage du TCC et un colmatage sans évènements hydrologiques majeurs.

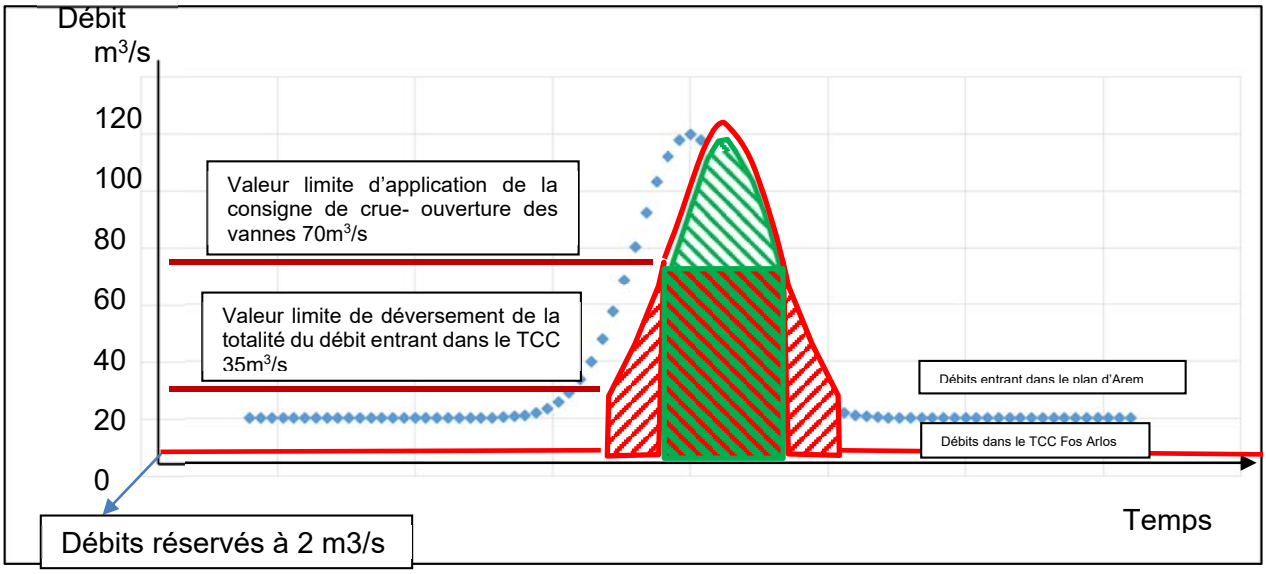


Figure 18 : Représentation théorique des phases d'érosion et de recharge dans le tronçon court circuité, lors d'une crue annuelle au niveau du plan d'Arem. En bleu, le débit entrant dans le plan d'Arem (bleu) et (rouge) déversé dans le tronçon court-circuité. Les phases d'érosions sont hachurées en rouge et les phases de recharge en vert. La partie rouge et verte matérialise le chevauchement entre les phases de recharges (crue > 70 m^3/s) et la phase d'érosion (crue < 70 m^3/s)

Stockage des sédiments dans le TCC lors des crues annuelles :

Lors des épisodes de crues récurrentes, comme au printemps 2018, les faibles surfaces de frayères obtenues dans le lit du TCC, malgré le transfert important en matériaux depuis l'amont du barrage, peuvent aussi s'expliquer par le fait que ces granulats se sont déposés en majorité sur des atterrissements (ilots et berges) situés en dehors du lit en configuration normale de débit réservé. Ces volumes ainsi stockés peuvent toutefois être redistribués lors des crues de moindre ampleur.

1.6 Cas de la Pique

1.6.1 Composition granulométrique de surface

Les résultats du suivi granulométrique sur les stations de la Pique sont présentés dans la Figure 19. Précisons que les données acquises en novembre 2017 dans les Gorges ne sont pas exploitables. Les résultats obtenus sur la station de Luret ne sont pas présentés ici compte tenu de la forte variabilité des données directement liée au fonctionnement de l'ouvrage.

Les ZPF suivies sur la station de la Carrosserie présentaient de novembre 2015 à novembre 2016, une granulométrie de surface relativement grossière, dominée par la classe des cailloux grossiers (min 40 %), les pierres fines (min 20 %) puis les sables (15 %). Depuis février 2017, la composition de la couche granulométrique superficielle s'améliorait, en s'enrichissant de classes favorables (dépôts de cailloux fins et graviers grossiers) et ce, jusqu'à février 2019 où des sables grossiers ont été retrouvés (25 %). Ces fluctuations de la nature des matériaux avec des recouvrements de sables grossiers observés sur la station carrosserie ne se retrouvent pas sur la station des Gorges.

Sur la station des Gorges, les pierres fines étaient retrouvées jusqu'en novembre 2016 (30 et 15 %). A partir de cette date, la granulométrie retrouvée sur la ZPF suivie s'améliore, ne dépassant jamais la classe des cailloux grossiers. Ceci est certainement le témoin des changements de modalités de gestion du transport solide mis en place au niveau du barrage de Luret. En effet, les matériaux extraits au pied du barrage sont désormais réinjectés quelques dizaines de mètres en aval de la zone d'accumulation et non plus exportés en carrière. Cette action permet une reprise des matériaux par le cours d'eau lors des évènements de fort débits.

Des fluctuations de la nature des matériaux sont observées avec des recouvrements de sables grossiers sur la station Carrosserie ne se retrouvant pas sur la station des Gorges. On peut s'apercevoir que les schémas de répartition granulométrique fluctuent entre le type duo et pyramide, ce qui correspond à un déroulement du transport solide satisfaisant.

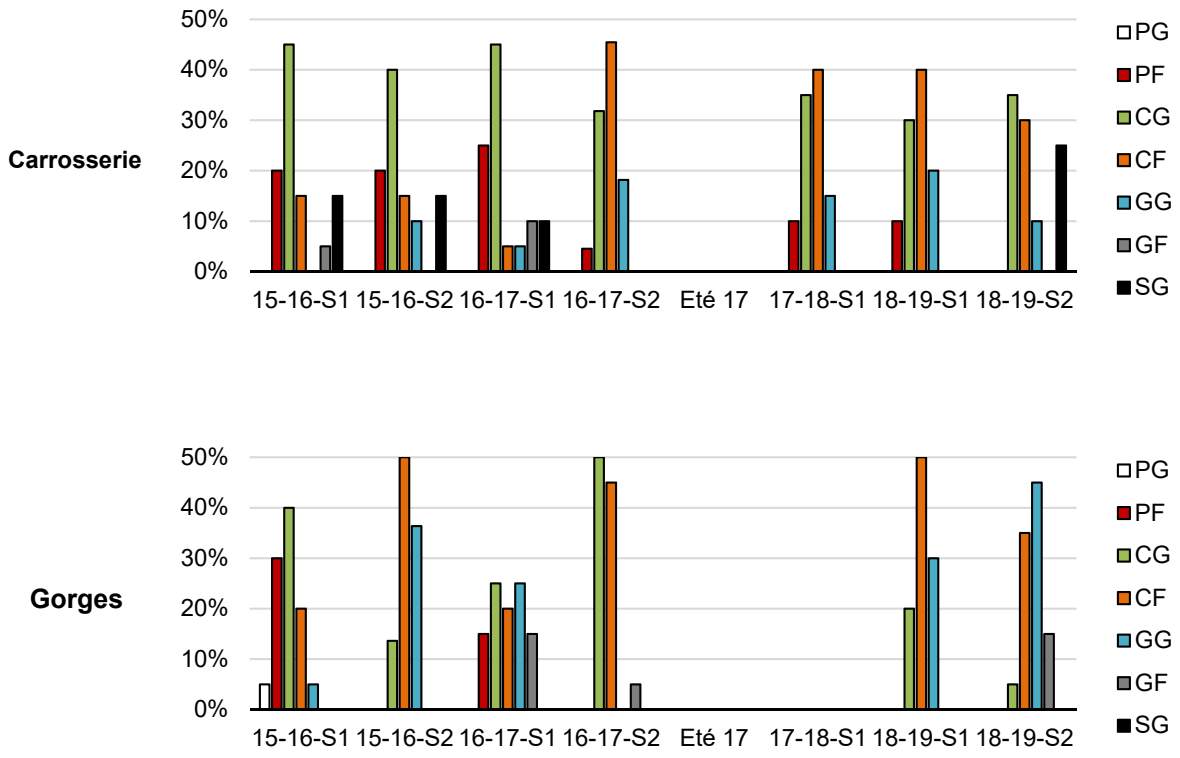


Figure 19 : Evolution de la composition granulométrique de surface des stations suivies sur la Pique de novembre 2015 à février 2019

1.6.2 Variations interannuelles de la proportion d'infiltration

La Figure 20 présente l'évolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction pour chaque année de suivi. Rappelons que les mesures de la station de Luret ne sont plus effectuées depuis novembre 2017.

Les frayères suivies sur la Pique semblent présenter une fonctionnalité perturbée puisque la proportion d'infiltration n'y est jamais maximale (à l'exception de novembre 2018 sur la station de la Carrosserie où P=1).

De manière générale, les P.I. varient entre 0,7 et 1 selon les saisons de reproduction et les stations considérées. Ceci témoigne d'une perturbation du transport solide sur le bassin versant (hydroélectricité et seuils RTM).

Figure 20 : Evolution des proportions d'infiltration calculées en début de période de reproduction de 2014 à 2018 sur la Pique

1.6.3 Variations interannuelles de la conductivité hydraulique

La Figure 21 présente la conductivité hydraulique mesurée sur l'ensemble des stations suivies sur la Pique depuis novembre 2015.

De manière générale, les valeurs de conductivité hydraulique moyenne restent stables sur l'ensemble de la période de suivi. L'essentiel des valeurs de conductivité restent dans les standards de référence (pour rappel des mesures réalisées sur les stations de référence ; 3<K<20 cm/h).

Notons que la station de Luret, étant soumise à de nombreux travaux et manœuvres d'abaissement du barrage, présente des valeurs fluctuantes.

A l'image des valeurs des répartitions granulométriques, ces valeurs correspondent à des conditions de conductivité hydraulique satisfaisantes grâce à la bonne dynamique du transport solide sur le bassin versant. En effet, il semblerait que les changements de modalités de gestion mis en place, pour le barrage de Luret (réinjection des sédiments accumulés à l'aval immédiat du barrage à la place d'une extraction vers les carrières) mais aussi au niveau des seuils RTM qui jalonnent la Pique en amont de Luchon, aient une action bénéfique sur le transport solide et le fonctionnement biologique de ce cours d'eau et probablement aussi, dans le même temps, sur le fonctionnement de la Garonne.

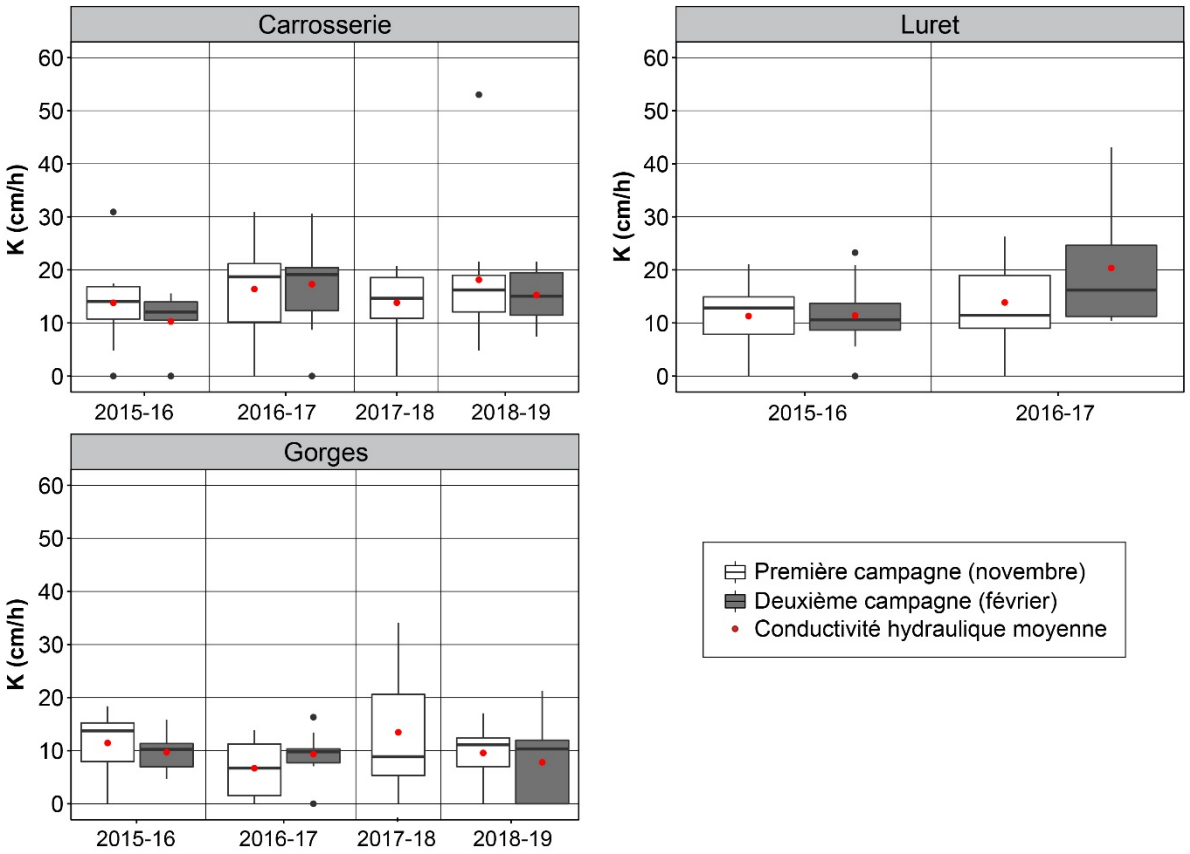


Figure 21 : Evolution de la conductivité hydraulique depuis novembre 2015 sur l'ensemble des stations suivies sur la Pique

1.7 Cas de la Neste d'Aure

1.7.1 Proportions d'infiltration

La Figure 22 ci-après présente les proportions d'infiltration calculées pour l'ensemble des sessions de mesures réalisées sur la Neste d'Aure depuis le début des suivis (novembre 2016).

Les valeurs obtenues suggéraient une hétérogénéité de la qualité des substrats des zones potentielles de frayères. En effet, en novembre 2016, les meilleures proportions d'infiltration étaient mesurées sur les stations de Rebouc et Izaux (P=1), alors que les autres stations présentaient des proportions d'infiltration comprises entre 0,6 et 0,9. Pendant la période d'incubation des œufs (de novembre 2016 à février 2017), les variations calculées des proportions d'infiltration sont hétérogènes selon les stations. En effet, les stations Cadéac et Rebouc conservent une proportion d'infiltration stable. Au contraire, les autres stations montrent toutes une diminution plus ou moins importante de ce paramètre.

Les mesures réalisées en novembre 2017 montrent des changements de la qualité des substrats pour l'ensemble des stations suivies. Le substrat des stations de Cadéac, Escalère et Lortet semble s'être restauré significativement (avec un gain de +0,2 à 0,5 points selon les stations). En revanche, les deux stations qui présentaient en 2016 les meilleurs substrats en début de période de reproduction voient leur proportion d'infiltration diminuer progressivement entre les campagnes de mesure. Les substrats disponibles en début de période de reproduction 2017 semblaient de qualité globalement similaire (soit moyens à très bons, 0,6≤P≤1) à celle de l'année précédente. Rappelons que les mesures prévues en février 2018 n'ont pas pu être réalisées en raison des forts débits enregistrés.

Les relevés réalisés en novembre 2018 semblent mettre en évidence une diminution marquée de la qualité du substrat sur l'ensemble des stations suivies. Des écarts de -0,1 à -0,7 points ont été mesurés avec les valeurs de novembre 2017 selon les stations considérées. Pendant l'hiver, la qualité des substrats semble globalement se restaurer. Seules les mesures réalisées sur Escalère diffèrent : le substrat ne semble pas se dégrader entre les hivers 2017-18 et 2018-19.

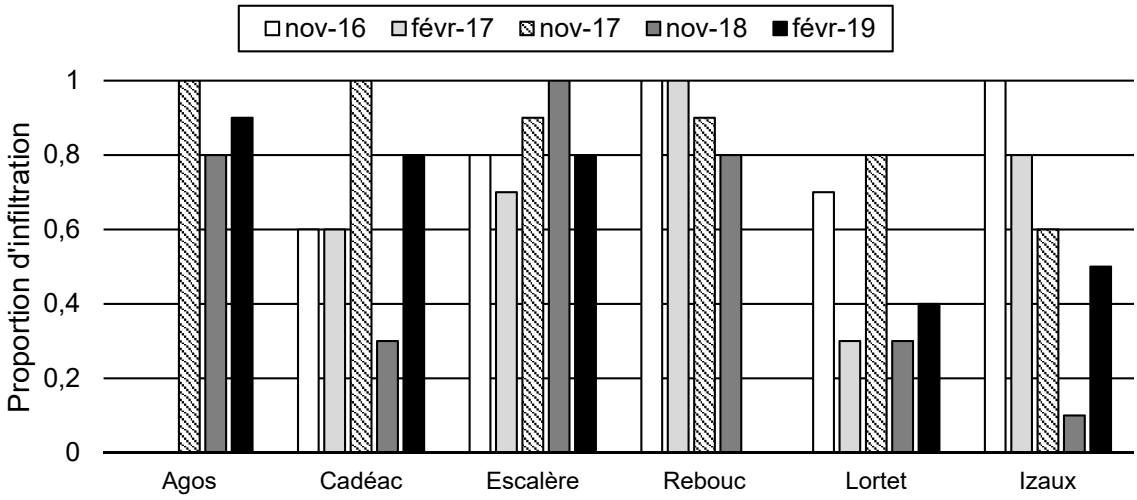


Figure 22 : Synthèse des données de proportion d'infiltration calculées dans le cas de la Neste d'Aure depuis novembre 2016

1.7.2 Conductivité hydraulique

Les valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur les stations régulièrement étudiées sur la Neste depuis le début du suivi sont présentées dans la Figure 23 ci-dessous. L'ensemble des données disponibles est présenté en Annexe 3.

Les analyses statistiques portant sur les mesures réalisées en début de période de reproduction mettent en évidence des différences significatives de conductivité hydraulique moyenne entre les stations (nov. 2016 : $X^2=21$, $p=7.7*10^{-4}$; nov. 2017 : $X^2=12$, $p=0.04$). Ceci résulte de valeurs moyennes particulièrement élevées sur la station d'Izaux (entre 14,3 et 27,6 cm/h selon l'année), et basses sur celle de Cadéac (entre 4,5 et 6,4 cm/h). Les autres stations présentent globalement des valeurs avoisinant les 10 cm/h.

Les tests statistiques ne permettent pas d'identifier des variations significatives de conductivité hydraulique pendant la période d'incubation des œufs 2016-17 ($p>0,05$), bien que des tendances à l'augmentation ou à la diminution puissent être remarquées selon les stations considérées. En effet, la conductivité hydraulique tend à augmenter de novembre à février pour les stations Cadéac (de 4,5 à 6,1 cm/h) et Rebouc (de 13,9 à 18,4 cm/h). Au contraire, on observe une tendance à la diminution plus ou moins importante de ce paramètre sur les autres stations. La plus grande diminution de la perméabilité est observée sur la station Izaux, où la conductivité hydraulique passe de 27,7 à 15,9 cm/h.

Le substrat disponible en début de période de reproduction en novembre 2017 semblait présenter une perméabilité globalement moins bonne qu'en novembre 2016 sur les secteurs suivis (moyenne globale de 9,8 cm/h en novembre 2017 contre 12,6 en novembre 2016). Toutefois, les stations Lortet, Agos et Izaux présentaient une meilleure perméabilité du substrat ($p<0,05$).

Les mesures de conductivité hydraulique réalisées en novembre 2018 viennent conforter les observations réalisées à partir des proportions d'infiltration (§1.7.1, Annexe 4). En effet, entre novembre 2017 et novembre 2018, les moyennes de conductivité sont globalement inférieures à celles mesurées l'année précédente (à l'exception toujours des stations de Rebouc et Escalère). On notera notamment une diminution d'environ 9 cm/h sur les stations d'Agos, Lortet et Izaux (soit des moyennes divisées par un facteur de 2 à 3). Toujours comme dans le cas des PI, on remarque une tendance à l'augmentation (non homogène entre les stations) des K pendant l'hiver 2018-19 (à l'exception d'Escalère).

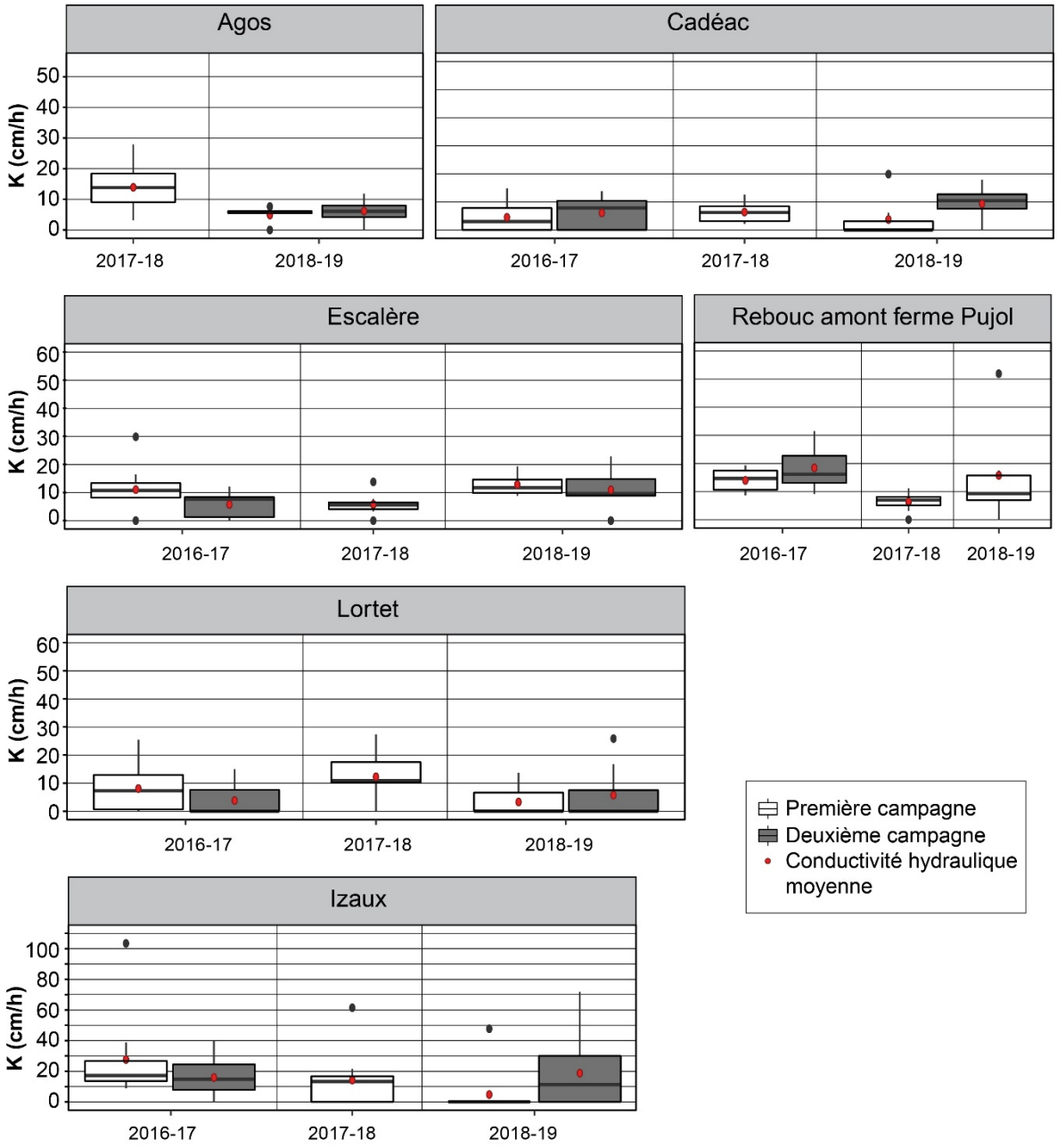


Figure 23 : Evolution de la conductivité hydraulique (K) depuis novembre 2016 sur la Neste d'Aure

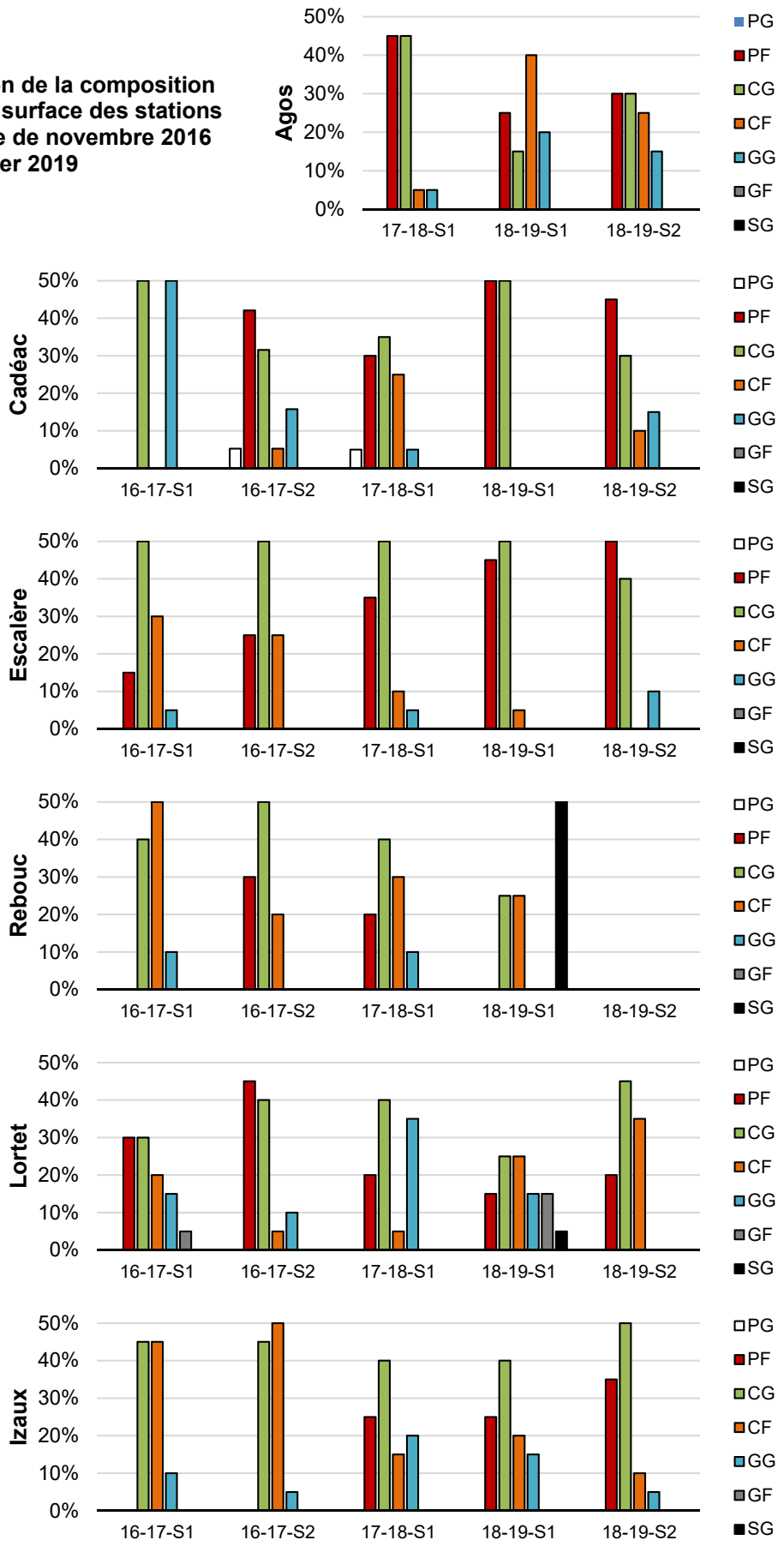
1.7.3 Composition granulométrique de surface

La Figure 24 dresse le bilan des suivis de composition granulométrique de surface réalisés sur la Neste depuis novembre 2016.

Les cailloux grossiers et cailloux fins constituent globalement les classes granulométriques principales et représentent en moyenne 65 % de la granulométrie étudiée (jusqu'à 100 % selon les cas). Ce premier constat fait sens compte tenu de la nature des secteurs recherchés (secteurs de reproduction potentiels de salmonidés).

Les pierres fines et grossières sont également bien représentées (18 % en moyenne, jusqu'à 47%). Comme expliqué dans le cas de la Garonne, l'évolution de la représentativité de ces classes les plus grossières peut constituer un indicateur supplémentaire de la composition et de l'évolution des zones suivies. En effet, il apparaît que des augmentations de la proportion des PF/PG s'accompagnent d'une diminution de la proportion d'infiltration et de la conductivité hydraulique moyenne. Ceci a notamment été observé pendant la première saison de reproduction (2016-17) sur Escalère et Lortet, ou bien entre février et novembre 2017 à Izaux.

Figure 24 : Evolution de la composition granulométrique de surface des stations suivies sur la Neste de novembre 2016 à février 2019



BILAN ET PERSPECTIVES

Les suivis réalisés sur **la Garonne** mettaient en évidence l'existence d'un léger gradient de diminution vers l'aval de la qualité des habitats de reproduction des salmonidés, ainsi qu'une tendance à la dégradation des secteurs suivis entre novembre 2015 et 2016. Toutefois, les nouvelles modalités de gestion du plan d'Arem et l'hydrologie relativement forte enregistrée au printemps 2017 semblent avoir permis une recharge en granulométrie favorable des ZPF en aval proche de l'ouvrage.

Pendant l'hiver 2018-2019, les valeurs de conductivité hydraulique relevées sur la Garonne sont meilleures en début de saison malgré toutefois la présence de points sans infiltration, symptomatiques d'un contexte de perturbations hydroélectriques. Le colmatage hivernal est plus sévère pour les stations aval qui sont les moins pentues et qui bénéficient d'une restructuration des crues printanières, ces dernières étant moins intensives et régulières que sur l'ensemble des stations. La station Plan d'Arem, impactée par le barrage, subit, elle aussi de fortes perturbations hivernales.

D'une manière générale, la dynamique sédimentaire complexe que l'on rencontre sur la Garonne se traduit par des fluctuations importantes des mesures de conductivité hydraulique réalisées lors de ces suivis. En considérant les modalités de gestion du transport solide appliquées sur la Plan d'Arem et sur la Pique, la succession des phases de colmatage et d'érosion que subissent les substrats des zones de frayères semble se traduire tout de même par un maintien de la fonctionnalité de ces habitats en période hivernale nécessaire au bon déroulement du cycle biologique des salmonidés.

Les valeurs de conductivité hydraulique moyennes mesurées sur **la Pique** restent stables sur l'ensemble de la période de suivi et ne mettent pas en évidence de dégradations depuis 2015. Malgré un transport solide perturbé, ce cours d'eau semble garder une certaine stabilité et une fonctionnalité pour la reproduction des poissons. Comme il a été observé sur certaines stations suivies sur la Garonne, la perméabilité du substrat tend à diminuer pendant l'hiver puis se restaure totalement ou partiellement pendant le reste de l'année.

La réinjection des sédiments accumulés à l'aval immédiat du barrage de Luret, à la place d'une extraction vers les carrières, semble avoir une action bénéfique sur le transport solide et le fonctionnement biologique de la partie aval de ce cours d'eau et probablement aussi dans le même temps sur le fonctionnement de la Garonne.

Les mesures réalisées sur **la Neste d'Aure** montrent une certaine hétérogénéité entre les stations en termes de conductivité mais également en proportions d'infiltration. Les mesures répétées au cours du suivi suggèrent également une forte variabilité des paramètres suivis entre les années mais également au cours d'une même saison de reproduction.

De manière générale on notera que les stations de Cadéac, Lortet et Izaux semblent présenter une qualité du substrat relativement moins bonne. En effet, ces stations présentent des proportions d'infiltration et des moyennes de conductivité hydraulique globalement plus faibles bien que très changeantes entre les campagnes de mesures. Ce sont également ces stations qui présentent une proportion relativement forte de pierres grossières.

Enfin, il semblerait que la qualité du substrat de la ZPF suivie à la station d'Izaux se dégrade progressivement. En effet, la conductivité hydraulique moyenne et la proportion d'infiltration diminuent globalement depuis le début du suivi. On remarquera également que la proportion de pierres fines sur ce secteur augmente progressivement au détriment de classes granulométriques plus favorables.

Ce suivi dresse un état de référence qui conclut à une amélioration des conditions hydro sédimentaires, amorcée par la crue 2013 et maintenue par de nouvelles modalités de gestion du transport solide au niveau des ouvrages. Malgré tout, il est important de rester vigilant car même si la relation entre le paramètre de conductivité hydraulique et la fonctionnalité biologique n'est pas possible, les mesures de conductivités hydrauliques restent un indicateur de l'état et de l'épaisseur de la couche de sédiments favorables à la ponte des salmonidés. Cette caractéristique conditionne la profondeur d'enfouissement des œufs, ce qui influence négativement le colmatage d'une part, et l'érosion des nids lors des crues d'autre part.

Une modification de la dynamique hydro sédimentaire est possible sur le moyen terme, ce qui permet de considérer qu'un suivi à des fréquences de 3 à 5 ans serait suffisant pour suivre cet état de référence.

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.

COLL M., DURBE G., BOSC S., MENCHI O., 2016. Evaluation du colmatage du substrat des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont – Année 2016, 28p.

COLL M., DURBE G., BOSC S., MENCHI O., 2017.Evaluation du colmatage du substrat des frayères à salmonidés sur le bassin de la Garonne amont – Année 2017, 35p.

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. Entretenir les 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 CONSULTES :

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

Consulté le 16/04/2020 sur : http://www.hydro.eaufrance.fr/

Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG) : débits moyens journaliers issus des stations de mesure en rivière (canal de la Neste et la Neste en aval de Sarrancolin)

Consulté le 30/01/2019 sur : https://www.cacg.fr/fr/

ANNEXES

Annexe 1 : Exemple de fiche terrain pour les relevés de conductivité hydraulique

FICHE DE TERRAIN Suivi colmatage

Station :
Cours d'eau :
Date :

Point	Prof. Enfoncement tube	H eau	H eau ds le tube	Tps écoulement	Dist entre pts	Dist RD	Granulométrie	Vitesse de courant			Faciès			N° Photo
	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(cm)	(m)	voir tableau	<0.2	0.2-0.5	>0.5	Ra	Pc	Mo.	

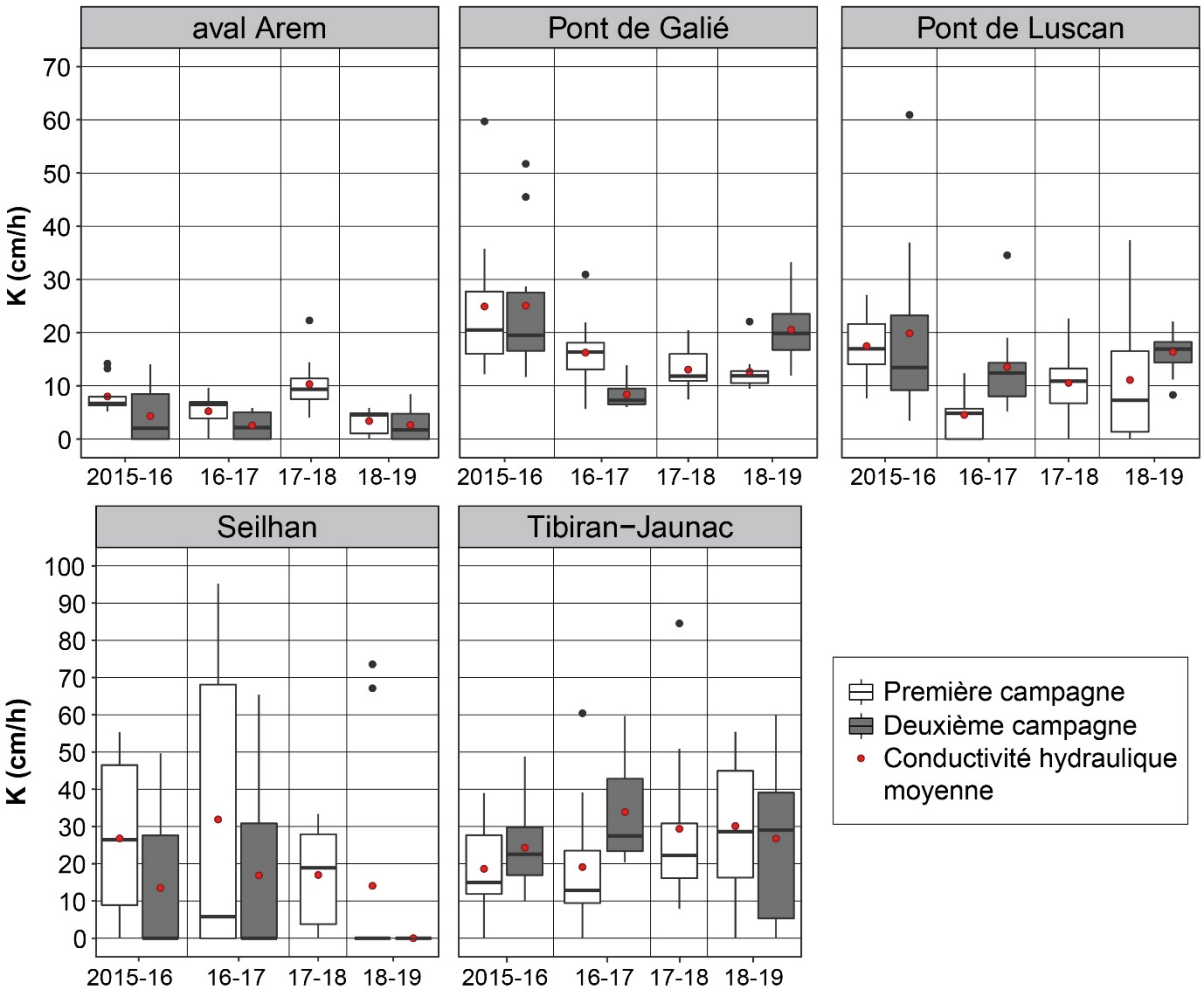
Schema de la station

RG

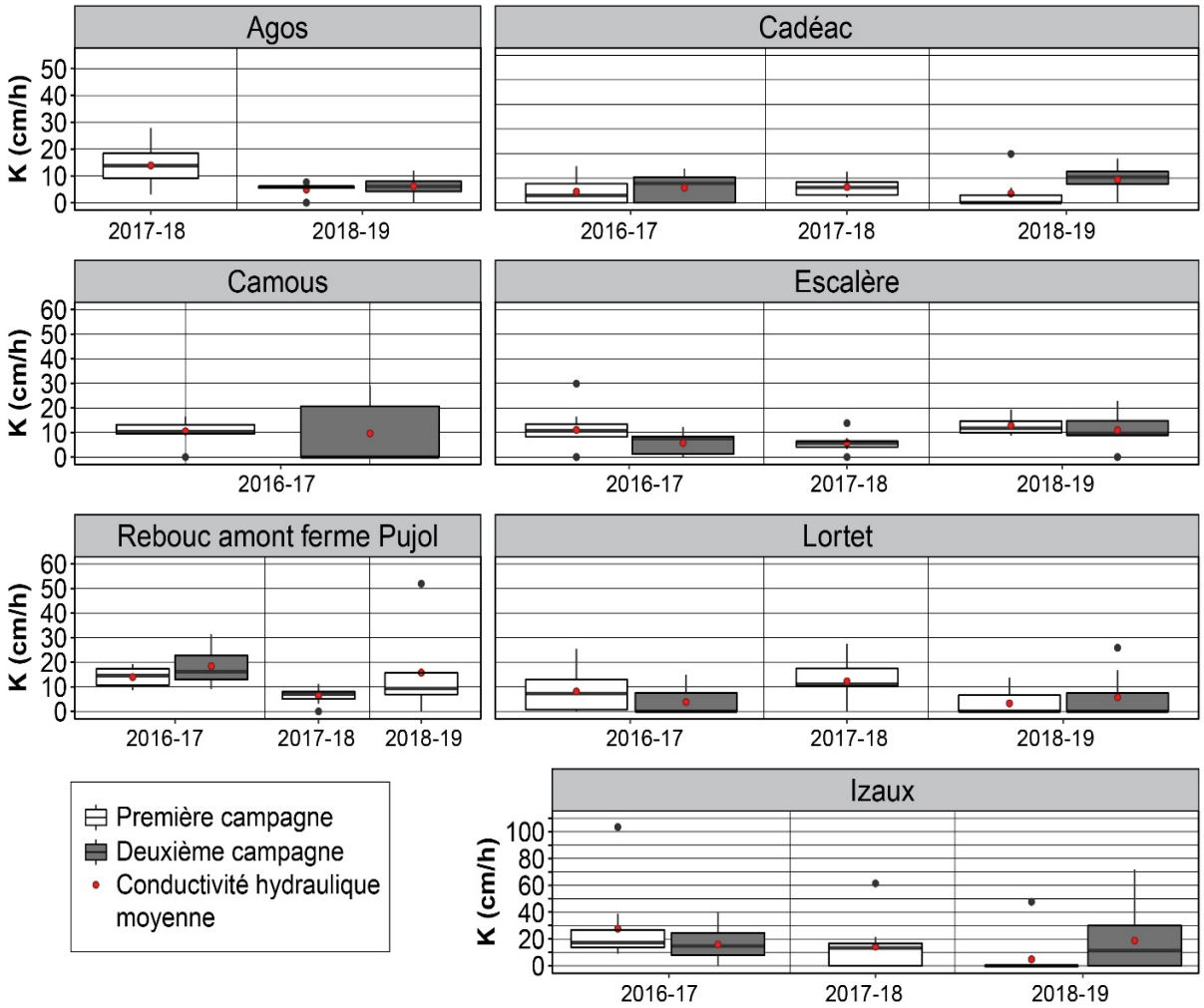
RD

Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
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

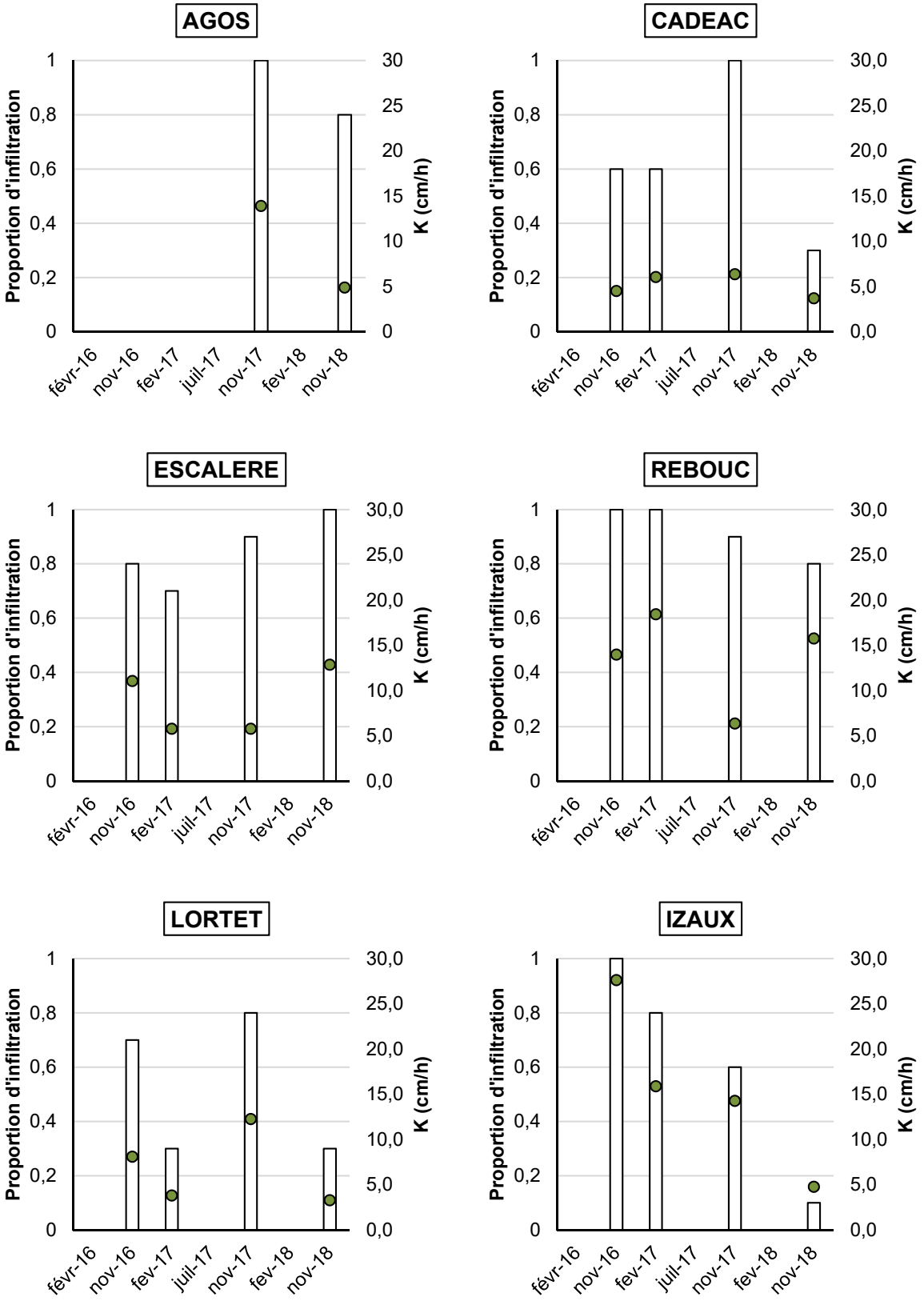
Annexe 2 : Bilan des valeurs de conductivité hydraulique mesurées sur la Garonne depuis novembre 2015



Annexe 3 : Bilan des valeurs de conductivité hydraulique (K) mesurées depuis novembre 2016 sur la Neste d'Aure



Annexe 4 : Evolution des conductivités hydrauliques moyennes et des proportions d'infiltration mesurées sur la Neste d'Aure depuis novembre 2016



VOLET 2 : MISE A JOUR DE LA CARTOGRAPHIE DES HABITATS FAVORABLES AU SAUMON ATLANTIQUE ET ESTIMATION DE LA CAPACITE D'ACCUEIL EN JUVENILES

SOMMAIRE

LISTE DES ILLUSTRATIONS III

1. INTRODUCTION 1

2. MATERIEL ET METHODE 2

2.1 SECTEUR D'ETUDE 2
2.2 PERIODE D'ETUDE ET CONTEXTE HYDROLOGIQUE 4
2.3 METHODOLOGIE CARTOGRAPHIQUE 5
2.3.1 Description morphodynamique 5
2.3.2 Inventaire des zones potentielles de frayères 7
2.4 HABITATS DE CROISSANCE DES JUVENILES 8
2.4.1 Estimation du potentiel de production en juvéniles (calcul de la surface d'Equivalents Radiers-Rapides) 8
2.4.2 Estimation de la production théorique du secteur en smolts de saumon 9
2.4.3 Analyse de la granulométrie des faciès favorables au grossissement 9
2.5 HABITATS TYPES DES SAUMONS ADULTES 10
2.5.1 Analyse des zones favorables à la reproduction 10
2.5.2 Analyse des zones potentielles de refuge (pré-frai) 10
2.6 ANALYSES DES TEMPERATURES 10

3. RESULTATS 12

3.1 DESCRIPTION GENERALE DES SECTEURS SUIVIS 12
3.2 HABITATS DE CROISSANCE DES JUVENILES 12
3.2.1 Granulométrie des faciès favorables à la croissance des juvéniles 12
3.2.2 Répartition des habitats de croissance et potentialités de production 13
3.3 HABITATS TYPES DES SAUMONS ADULTES 15
3.3.1 Zones potentielles de reproduction 15
3.3.1 Zones potentielles de refuge (pré-frai) 17
3.4 ANALYSE DES TEMPERATURES SUR LE SECTEUR SUIVI 18

4. BILAN ET PERSPECTIVES 19

BIBLIOGRAPHIE 20

ANNEXES 22

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : Localisation du secteur d'étude 3
Figure 2 : Comparaison des débits mensuels moyens et maximums de l'Ariège à Foix entre l'année 2019 et sur les 4 dernières années (*source : Banque Hydro*) 4
Figure 3 : Débits journaliers moyens enregistrés sur l'Ariège 4
Figure 4 : Illustration de l'application de saisie QField 5
Figure 5 : Clé de détermination des principaux faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002) 6
Figure 6 : Gradient de densité de juvéniles de saumon selon les faciès d'écoulement (Cazeneuve et al., 2008) .. 9
Figure 7 : Composition granulométrique dominante et accessoire des faciès favorables au grossissement des juvéniles de saumon 13
Figure 8 : Evolution des surfaces des radiers et rapides entre 2014 et 2019 14
Figure 9 : Localisation des zones de frayères potentielles 16
Figure 10 : Composition granulométrique des zones de frayères potentielles 17
Figure 11 : Répartition des températures horaires enregistrées à Foix pendant la période de croissance des juvéniles de saumon entre 2016 et 2019 18

TABLEAUX

Tableau 1 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989) 7
Tableau 2 : Classes utilisées pour la description du recouvrement par la végétation aquatique 7
Tableau 3 : Classes utilisées pour la description de l'ombrage 7
Tableau 4 : Bilan des caractéristiques des habitats de reproduction du saumon atlantique 8
Tableau 5 : Principales caractéristiques* des habitats de croissance estivale utilisés par les juvéniles de saumon atlantique (Cazeneuve et al., 2008) 8
Tableau 6 : Bilan des surfaces des différents faciès d'écoulement recensés sur les tronçons prospectés 12
Tableau 7 : Bilan des surfaces d'Equivalents Radier-Rapide (ha) et des potentiels de production de smolts estimés 14
Tableau 8 : Bilan des surfaces de frayères potentielles 15
Tableau 9 : Bilan des indicateurs thermiques généraux calculés à partir de données horaires 18

ANNEXES

Annexe 1 : Cartographie des faciès d'écoulement et des zones potentielles de frayères 23
Annexe 2 : Surfaces des faciès présentant les marnes comme classe granulométrique dominante ou accessoire 24
Annexe 3 : Composition granulométrique des zones identifiées comme refuges potentiels 24
Annexe 4 : Evolution des températures sur l'Ariège à Foix, comparaison des données entre 2016 et 2019 25

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du plan de restauration du saumon atlantique sur le bassin de la Garonne, MIGADO effectue des opérations de repeuplement en juvéniles sur la partie amont du bassin. Plusieurs études ont été réalisées dans le but d'estimer les surfaces favorables à la croissance des jeunes stades déversés, afin d'optimiser les stocks repeuplés.

Cette étude fait suite à la dernière cartographie des habitats de l'Ariège réalisée en 2014 et a pour objectifs de :

(1) Mettre à jour la cartographie des habitats favorables à la croissance des jeunes stades, utile à la définition du plan d'alevinage

(2) Redéfinir le potentiel de production en smolts du secteur suivi

(3) Mettre à jour les connaissances sur les habitats types utilisables par les adultes (zones de refuge et frayères potentielles)

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 Secteur d'étude

Le secteur cartographié correspond au linéaire de l'Ariège compris entre l'aval du barrage de Labarre et la restitution de l'usine d'Auterive, d'une longueur totale de 60,4 km.

Le linéaire cartographié peut être découpé en 5 tronçons (Figure 1) :

- T1 : De l'aval du barrage de Labarre jusqu'à la restitution de la centrale hydroélectrique de Guillot.
- T2 : De la restitution de la centrale hydroélectrique de Guillot jusqu'au barrage de la Cavalerie.
- T3 : Du barrage de la Cavalerie jusqu'à la restitution de la centrale hydroélectrique de Pébernat (intégralité du tronçon court-circuité).
- T4 : De la restitution de la centrale hydroélectrique de Pébernat jusqu'au barrage de Saverdun.
- T5 : Du barrage de Saverdun jusqu'à la restitution de l'usine d'Auterive.

Les saumons adultes piégés à la station de Golfech sont déversés à Varilhes et aucun alevinage n'est réalisé sur le tronçon T1.

Les secteurs T2 à T5 sont repeuplés en juvéniles de saumons.

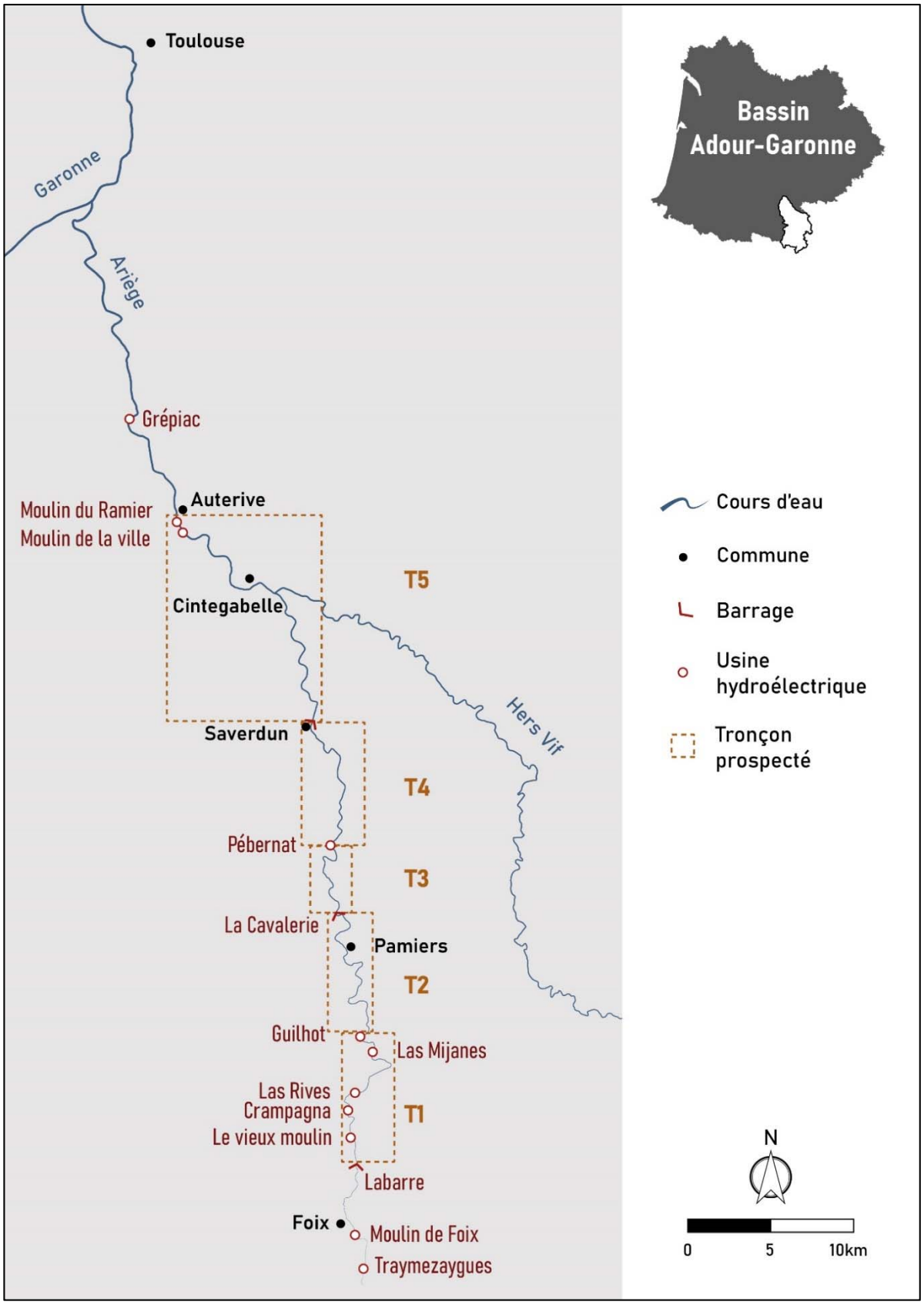


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude

2.2 Période d'étude et contexte hydrologique

La cartographie des différents faciès d'écoulement de l'Ariège a été principalement réalisée pendant la période d'étiage estival, soit du 16 au 26 juillet et du 18 septembre au premier octobre 2019.

La Figure 2 ci-dessous présente les débits mensuels moyens et journaliers moyens maximums enregistrés à Foix (09) sur l'année 2019 et pour la période 2015-2018 (*source : Banque Hydro*).

De manière générale, le régime hydrologique de l'Ariège est caractérisé à ce niveau par de plus forts débits au printemps, liés à la fonte des neiges, ainsi que par un étiage estival relativement marqué. Au regard des débits moyens et des maximums mensuels enregistrées, l'année 2019 se caractérise par une hydrologie assez faible.

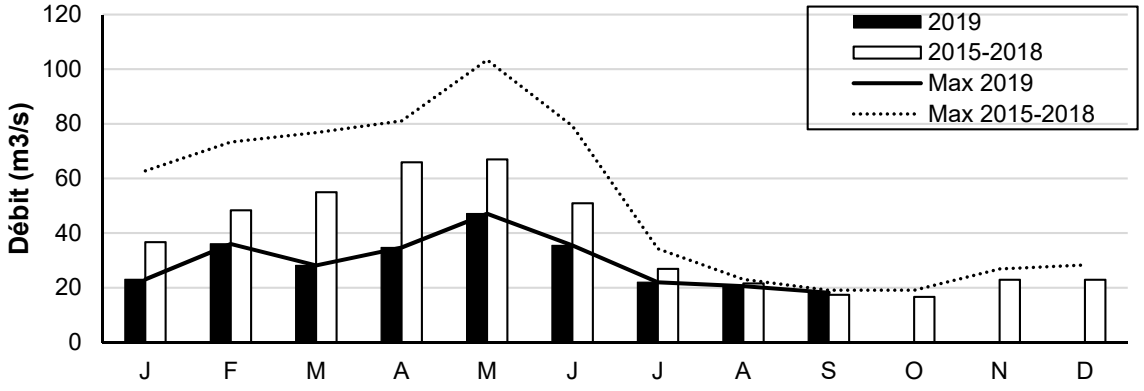


Figure 2 : Comparaison des débits mensuels moyens et maximums de l'Ariège à Foix entre l'année 2019 et sur les 4 dernières années (*source : Banque Hydro*)

Les débits journaliers moyens sur le secteur cartographié sont présentés dans la Figure **3**. De manière générale, les prospections se sont déroulées dans des conditions de débits relativement bas, soient compris entre 10,3 et 30,8 m^3/s. La détermination des différents faciès d'écoulement s'en est trouvée facilitée.

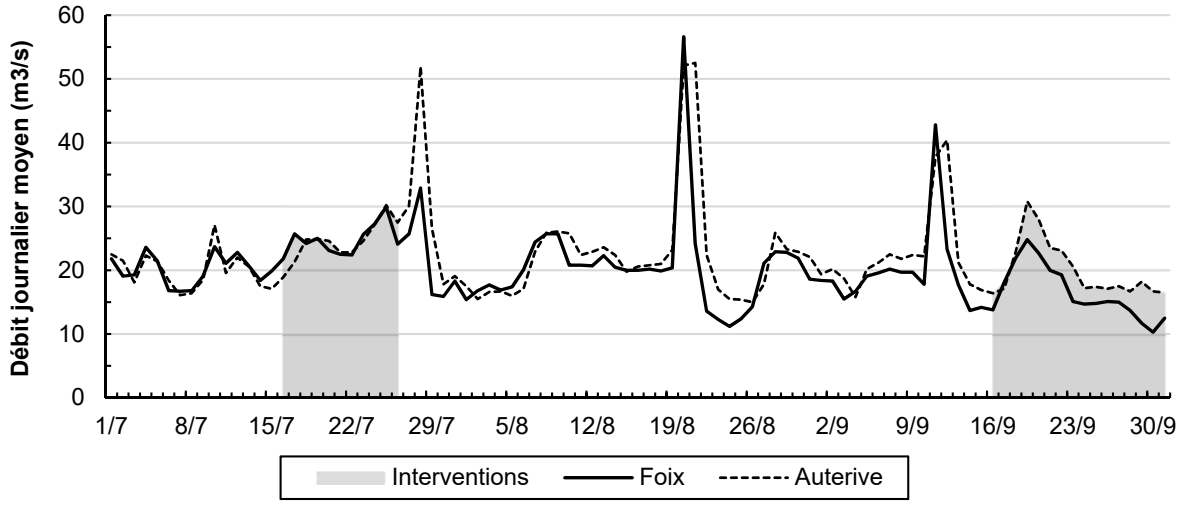


Figure 3 : Débits journaliers moyens enregistrés sur l'Ariège (*source : Banque Hydro*)

2.3 Méthodologie cartographique

2.3.1 Description morphodynamique

L'ensemble du linéaire concerné par l'étude a fait l'objet d'une prospection à pied ou en canoë. La description du linéaire a été réalisée à l'échelle des faciès d'écoulement (ou macrohabitats), considérés comme étant des portions de cours d'eau présentant des conditions de vitesse, de profondeur, de granulométrie et de pente relativement homogènes (Malavoi, 1989).

Une fois déterminées, les limites de chaque faciès d'écoulement ont été reportées sur l'application QField, interface de saisie embarquée du logiciel de SIG QGis (Figure 4). Ceci permet notamment de calculer avec précision les surfaces de chaque faciès.

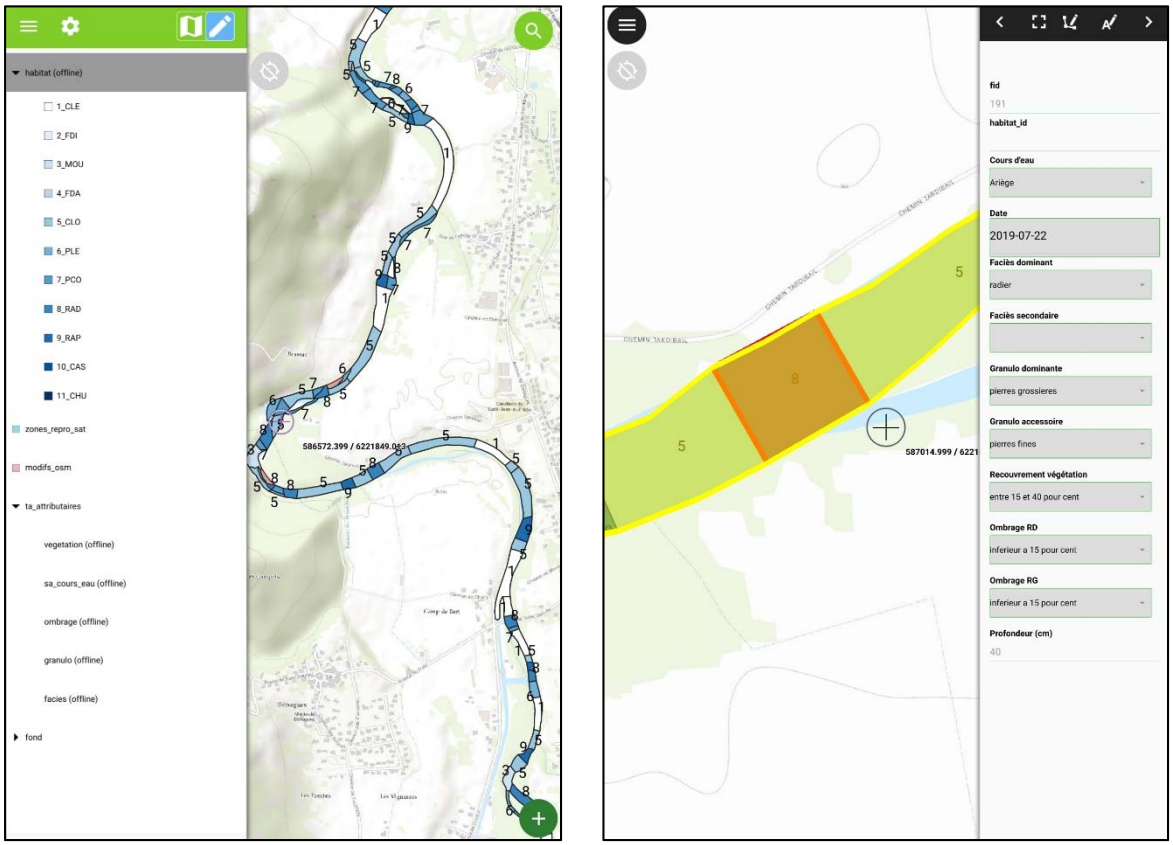


Figure 4 : Illustration de l'application de saisie QField

De plus, pour chaque faciès d'écoulement, les paramètres suivants ont été relevés :

(1) Le type de faciès d'écoulement dominant (et accessoire si besoin), à partir de la clé dichotomique ci-dessous :

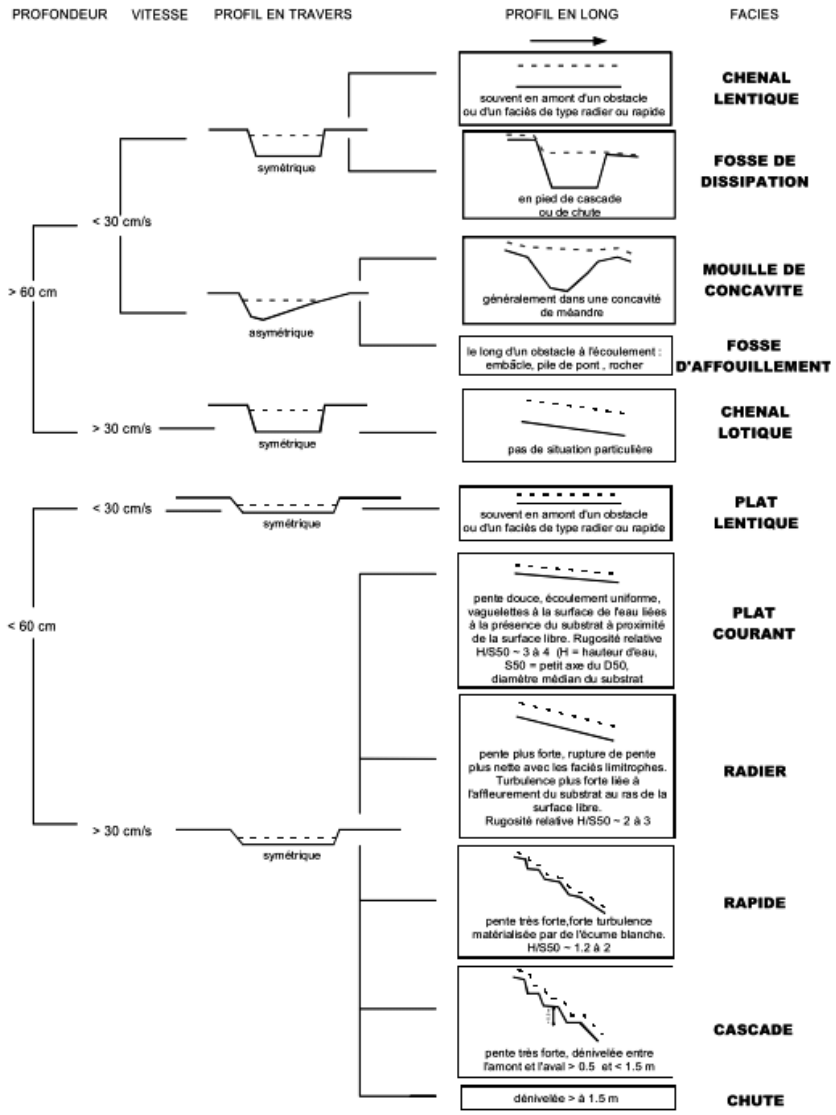


Figure 5 : Clé de détermination des principaux faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002)

(2) Les granulométries dominantes et accessoires, déterminées à partir de l'échelle granulométrique ci-dessous :

Tableau 1 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée par Malavoi et Souchon (1989)

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

(3) Le recouvrement par la végétation aquatique selon les classes suivantes :

Tableau 2 : Classes utilisées pour la description du recouvrement par la végétation aquatique

Recouvrement estimé	Classe
< 5%	1
5 à 15%	2
15 à 40%	3
40 à 70%	4
>70%	5

(4) L'ombrage résultant de la végétation rivulaire **:**

Tableau 3 : Classes utilisées pour la description de l'ombrage

Ombrage estimé	Classe
< 15%	1
15 à 60%	2
>60%	5

2.3.2 Inventaire des zones potentielles de frayères

Les frayères potentielles de salmonidés sont généralement localisées dans des zones de transition entre des faciès d'écoulement de type « mouille » et « radier », où la vitesse de courant augmente avec la diminution de la hauteur d'eau (Bardonnet et Baglinière, 2000 ; Crisp, 1996).

Les caractéristiques hydromorphologiques des zones potentielles de reproduction du saumon atlantique sont synthétisées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Bilan des caractéristiques des habitats de reproduction du saumon atlantique

Variable environnementale	Type de mesure	Valeurs	Auteurs
Vitesse (cm/s)	Minimum	15-20	Crisp et Carling, 1989
	Rang	31-46	Jones (1959) dans Gibson, 1993
		35-80	Moir et al., 1998
		35-65	Louhi et al., 2008
	Moyenne	40	Heggberget (1991) dans Armstrong, 2003
		50	Gueguen et Prouzet,1994
		53	Beland et al., 1982
Hauteur d'eau (cm)	Rang	15-40	Moir et al., 1998
		20-50	Louhi et al., 2008
	Moyenne	38	Beland et al., 1982
		50	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	Gueguen et Prouzet,1994
		15-25	Bardonnet et Baglinière, 2000
% de fines	<1mm	<20%	Crisp et Carling, 1989
	0,5 – 2,2mm	10 – 15%	Peterson, 1978

Chaque zone de frayère potentielle est détourée à pied afin d'enregistrer les limites sous l'application QField. Pour chacune d'entre elles, les paramètres tels que les granulométries dominantes et accessoires, le recouvrement végétal et l'ombrage sont relevés à partir des mêmes classes que celles utilisées dans la caractérisation des faciès d'écoulement.

2.4 Habitats de croissance des juvéniles

2.4.1 Estimation du potentiel de production en juvéniles (calcul de la surface d'Equivalents Radiers-Rapides)

La capacité d'accueil en saumon atlantique d'un cours d'eau est principalement déterminée par l'habitat physique disponible ainsi que par les conditions physico-chimiques et thermiques (limitantes pour la physiologie des poissons).

Le Tableau 5 ci-dessous synthétise les caractéristiques hydro-morphologiques des habitats de croissance utilisés par les juvéniles de saumon atlantique (Cazeneuve et *al*., 2008).

Tableau 5 : Principales caractéristiques* des habitats de croissance estivale utilisés par les juvéniles de saumon atlantique (Cazeneuve et al., 2008)

	Individu de taille < 7cm	Individu de taille > 7cm
Profondeur (cm)	10-40 (5-90)	20-60 (10-300)
Vitesse (cm/s)	20-40 (10-70)	0-80
Taille du substrat (mm)	16-256 (graviers, petits et gros galets)	64-512 (petits et gros galets, petits blocs)

**Valeurs couramment rencontrées, les valeurs extrêmes sont entre parenthèse*

Du fait de ces exigences, les juvéniles de saumon atlantique privilégient pour leur croissance estivale soit des zones courantes, de profondeur relativement réduite et à substrat grossier, soit des faciès de type radiers et rapides (Heggenes & Saltveit, 1990 ; Heland et al., 1995 ; Bardonnet & Baglinière, 2000). Cependant, les résultats de pêches électriques réalisées par MIGADO dans le cadre des suivis des populations de tacons indiquent que ces jeunes stades occupent, dans une moindre mesure, des faciès de types plats courants et plats lentiques (Figure 6).

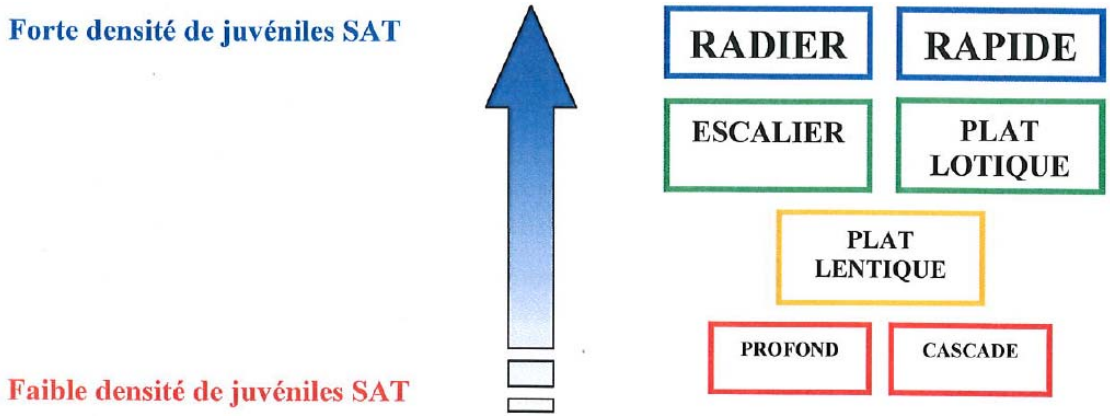


Figure 6 : Gradient de densité de juvéniles de saumon selon les faciès d'écoulement (Cazeneuve et al., 2008)

Ainsi, il est donc possible d'estimer le potentiel de production du secteur étudié en calculant les surfaces d'Equivalents Radier-Rapide (ERR) selon la formule suivante :

$$Surface\ d'ERR\ (m^2) = S.Radiers + S.Rapides + 0.4 * S.Plats\ Courants + 0.1 * S.Plats\ lentiques$$

Notons que seuls les faciès présentant des caractéristiques conformes à celles citées dans le Tableau 5 ci-dessus ont été pris en compte dans le calcul de surfaces ERR. Ont été exclus notamment ceux présentant une profondeur inférieure à 10 cm ainsi que ceux caractérisés par une granulométrie dominante non comprise entre les graviers grossiers et la pierre grossière (marnes dans notre cas).

2.4.2 Estimation de la production théorique du secteur en smolts de saumon

Il s'agit ici de calculer la production théorique du secteur suivi en smolts de saumons à partir des surfaces de production (ERR) estimées ci-dessus. Dans le cas de la Garonne, on estime que le potentiel de production avoisine les 5 à 10 smolts dévalants pour 100 m² d'ERR (Gayou, 1986).

Ainsi, il est donc possible d'estimer la production minimum (P_{min}) et maximum (P_{max}) de smolts pour les deux tronçons suivis selon le calcul suivant :

$$P_{min} = 5 * ERR * 10^2$$

$$P_{max} = 10 * ERR * 10^2$$

2.4.3 Analyse de la granulométrie des faciès favorables au grossissement

Les relevés réalisés permettent d'apprécier la composition granulométrique des faciès identifiés comme étant favorables au grossissement des juvéniles de saumon.

La représentativité d'une classe granulométrique est exprimée en proportion de la surface que représente le faciès sur lequel cette classe a été identifiée, en rapport à la surface totale prospectée. Les calculs sont réalisés pour les granulométries dominantes puis accessoires des radiers, rapides, plats courants et plats lents, faciès pris en compte dans le calcul des ERR.

Notons qu'il s'agit ici d'une description générale dans la mesure où nous ne disposons pas de la surface exacte représentée par chaque classe granulométrique, qu'elle soit dominante ou accessoire. L'objectif de cette analyse est de déterminer la part représentée par les granulométries défavorables à la croissance des juvéniles (marnes ou sables par exemple).

2.5 Habitats types des saumons adultes

2.5.1 Analyse des zones favorables à la reproduction

La cartographie des zones potentielles de frayères telle que réalisée ici permet dans un premier temps de calculer précisément leurs surfaces ainsi que leur représentativité à l'échelle des tronçons suivis. Elle permet également d'étudier leur répartition le long du linéaire prospecté.

Comme réalisé pour les zones de grossissement des juvéniles, une analyse granulométrique est réalisée pour les zones potentielles de reproduction (représentativité de chaque classe granulométrique dans le cas de la granulométrie dominante et accessoire).

2.5.2 Analyse des zones potentielles de refuge (pré-frai)

Les saumons adultes ont besoin de zones de repos et de séjour, leur fournissant de l'ombre ainsi que d'une protection contre les prédateurs. Ces habitats leur sont utiles tant au cours de la migration de montaison qu'en aval des zones de frai, où ceux-ci séjournent en attendant la période de reproduction (Crisp, 1996 ; Gueguen et Prouzet, 1994).

Ainsi, les adultes recherchent des zones d'eau calmes et profondes (profondeur supérieure à 0,9m), ombragées et dont la température n'excède pas les 28°C (Bardonnet et Baglinière, 2000).

Il s'agit ici d'analyser la représentativité et la localisation de ces zones de refuge potentielles, et de s'assurer de leur présence à proximité des zones identifiées comme frayères potentielles.

2.6 Analyses des températures

La température de l'eau est un facteur limitant de la qualité d'un milieu vis-à-vis des populations de saumons. Les seuils de températures optimales et létales sont fonction du stade de développement considéré. Des températures comprises entre 16 et 20°C sur la période d'avril à octobre sont considérées comme optimales pour la croissance des juvéniles (Jonsson, 2001). En revanche, des températures inférieures à 7°C ou supérieures à 21°C engendrent du stress et peuvent être létales pour les individus (Cornu, s.d).

Les données thermiques traitées ici ont été enregistrées à Foix, à l'aide d'une sonde thermique Tinytag Aquatic 2 de type TG-4100. Les enregistrements y sont réalisés au pas horaire.

Une première analyse est réalisée afin de comparer la répartition des températures instantanées enregistrées sur le secteur suivi aux exigences thermiques des juvéniles de saumons pour leur croissance. Dans un souci de représentativité et de validité des données,

cette description portera sur les données horaires enregistrées d'avril à octobre entre 2016 et 2019.

Enfin, pour décrire le régime thermique général du secteur suivi, une série d'indicateurs ont été calculés sur les données horaires enregistrées entre 2016 et 2019 à Foix (années complètes).

Les indicateurs suivants ont été calculés à l'aide de la Macro Excel MACMASalmo 1.0 (Dumoutier et *al.*, 2010) :

- **Ti min :** Température instantanée minimale
- **Ti max :** Température instantanée maximale
- **ATi max :** Valeur de l'amplitude thermique journalière la plus élevée
- **Tmin :** Température moyenne journalière minimale
- **Tmax :** Température moyenne journalière maximale
- **T30 :** Température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (sur la base de températures moyennes journalières)

3. RESULTATS

3.1 Description générale des secteurs suivis

Le Tableau 6 ci-dessous synthétise les surfaces estimées pour chaque type de faciès d'écoulement sur l'ensemble des tronçons prospectés. Au total, 60,4 km ont été parcourus entre l'aval du barrage de Labarre et la restitution de la centrale hydroélectrique d'Auterive, représentant une superficie de 265,9 ha. Un atlas cartographique est disponible en Annexe 1.

Les faciès d'écoulement de type courant présentant théoriquement un intérêt en termes d'habitats pour les juvéniles de saumons tels que les radiers, rapides et plats courants représentent une superficie de 57,7 ha à l'échelle du linéaire prospecté, soit 22 % de la surface totale. Ces trois faciès ont tendance à être davantage représentés sur les secteurs T2 à T4 (de la centrale de Guilhot au Barrage de Saverdun) où ils représentent entre 21 et 38 % de la surface des tronçons.

Les faciès lents et profonds (type chenal lentique) sont globalement majoritaires et représentent 123,9 ha de Labarre à Auterive, soit 30 à 53 % de la surface de chaque tronçon.

Les fosses de dissipation et d'affouillement sont minoritaires à l'échelle du linéaire puisqu'elles ne représentent que 1 à 3 % de la surface cartographiée selon le tronçon considéré. Elles ont été localisées au droit de barrages, seuils ou piles de ponts.

Tableau 6 : Bilan des surfaces des différents faciès d'écoulement recensés sur les tronçons prospectés

Tronçon	L (km)	RAD		RAP		PCO		PLE		CLO		CLE		MOU		FDI		FDA	
		ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
T1	14,3	4,1	6	2,5	4	5,5	8	1,5	2	16,6	25	34,3	51	0,7	1	1,8	3	0	0
T2	9,9	2,5	6	2,3	5	6,5	15	0,6	1	16,7	39	13,0	30	1,0	2	0,0	0	0,0	0
T3	6,8	2,1	10	1,1	5	4,4	22	0,8	5	2,2	11	7,4	37	1,6	8	0	0	0,2	1
T4	9,1	2,8	8	0,5	1	4,2	12	1,1	3	8,8	24	16,1	44	2,1	6	0	0	1,1	3
T5	20,3	8,0	8	1,1	1	10,1	10	4,1	4	15,1	15	53,1	53	5,0	5	0,1	0	3,0	3
Total	60,4	19,5	7	7,4	3	30,8	12	8,1	3	59,4	22	123,9	47	10,3	4	1,9	1	4,3	2

RAD : radier, RAP : rapide, PCO : plat courant, PLE : plat lent, CLO : chenal lotique,CLE : chenal lentique, MOU : mouille de concavité, FDI ; fosse de dissipation, FDA : fosse d'affouillement

3.2 Habitats de croissance des juvéniles

3.2.1 Granulométrie des faciès favorables à la croissance des juvéniles

La Figure 7 ci-dessous présente l'ensemble des classes granulométriques recensées ainsi que leur représentativité à l'échelle des faciès favorables (radiers, rapides et plats courants). Rappelons que les proportions présentées sont données à titre indicatif puisque les surfaces exactes pour chaque classe granulométrique sont inconnues.

Les pierres grossières et pierres fines composent majoritairement les granulométries dominantes relevées au niveau des faciès favorables à la croissance des juvéniles. Ces deux classes granulométriques représentent entre 45 et 95 % de la surface des faciès considérés. Les classes plus fines telles que les cailloux grossiers et cailloux fins peuvent être retrouvées dans la description de la granulométrie accessoire.

Les sables (fins et grossiers) et les limons ont été retrouvés sur quelques faciès de type plats lents, mais ne constituent qu'une faible proportion de la granulométrie décrite (dominante ou accessoire).

Enfin, notons qu'une certaine proportion des faciès d'intérêt est constituée de marnes, et est donc considérée comme non utilisable par les juvéniles de saumons pour leur croissance. Ces marnes représentent 16 % de la surface des rapides (1,2 ha), 6 % de la surface des plats courants (1,9 ha), 26 % de celle des plats lents (2,1 ha) et sont anecdotiques dans les radiers (1 % de leur surface). Bien que présentes sur l'ensemble du linéaire, les marnes sont largement localisées en aval de Saverdun (Annexe 2). Ces surfaces non favorables ne seront pas prises en compte dans le calcul des surfaces d'Equivalents Radier-Rapide et de la production potentielle en smolts.

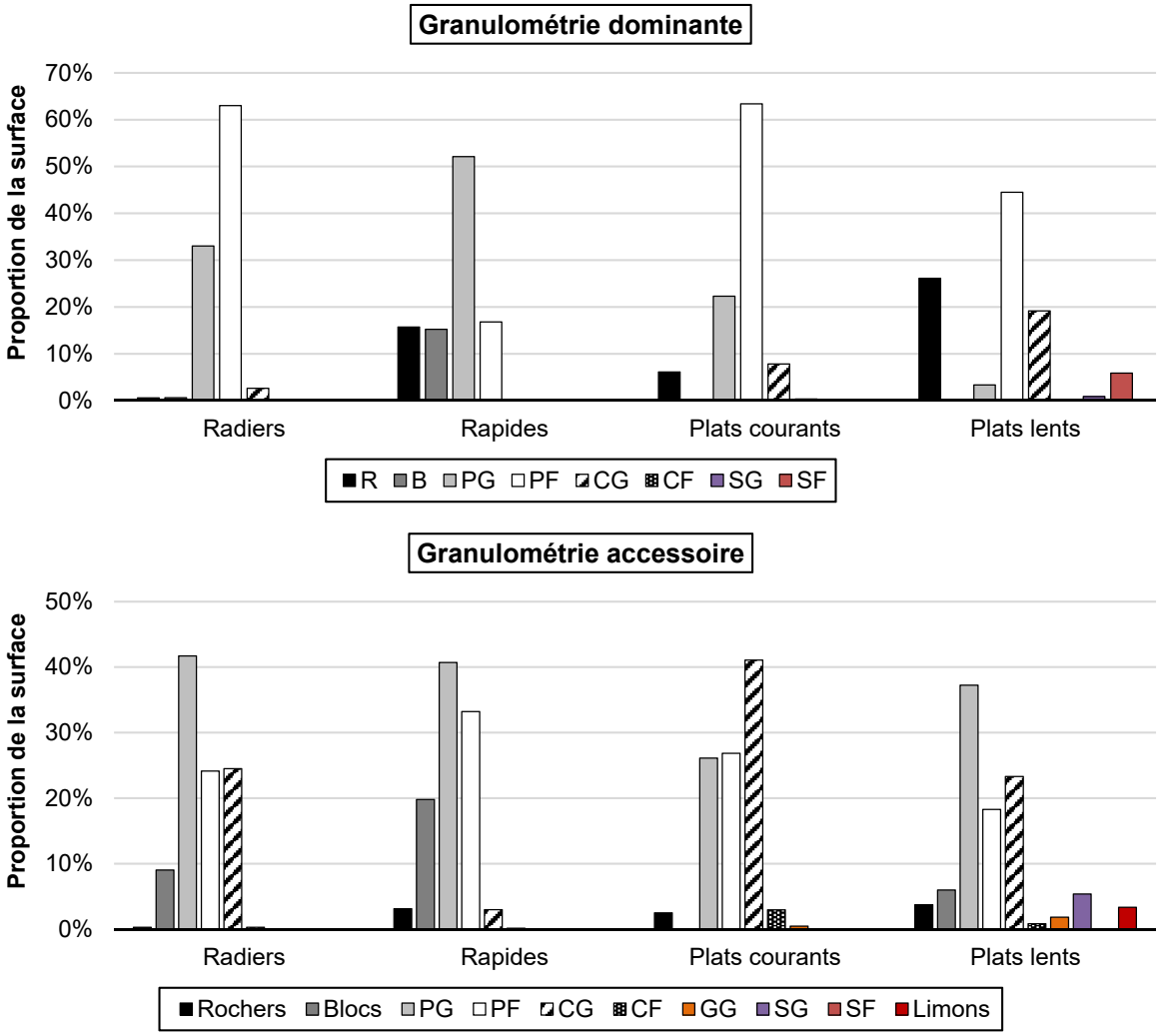


Figure 7 : Composition granulométrique dominante et accessoire des faciès favorables au grossissement des juvéniles de saumon

3.2.2 Répartition des habitats de croissance et potentialités de production

Rappelons que le calcul des Equivalents Radier-Rapide (ERR) est réalisé à partir des surfaces de radiers, rapides, plats courants et plats lents dont les caractéristiques hydromorphologiques sont conformes aux exigences des juvéniles de saumon pour leur croissance. Les faciès dont la hauteur d'eau est inférieure à 10 cm et/ou dont la classe granulométrique dominante n'est pas comprise entre le gravier grossier et la pierre grossière sont exclus du calcul des ERR.

Après pondération des faciès d'écoulements considérés comme étant moins favorables à la croissance des juvéniles (plats courants et plats lents), la surface totale d'ERR

sur le secteur étudié est estimée à 36,5 ha (Tableau 7). Cette surface équivaut à un potentiel de production compris entre 18 259 et 36 519 smolts dévalants.

Au regard des surfaces calculées, les secteurs les moins productifs correspondent au linéaire localisé entre le barrage de la Cavalerie et Saverdun (incluant le tronçon court-circuité de l'usine hydroélectrique de Pébernat).

Tableau 7 : Bilan des surfaces d'Equivalents Radier-Rapide (ha) et des potentiels de production de smolts estimés

Tronçon		Surfaces (ha)					Production en smolts	
N°	Longueur (km)	RAD	RAP	PCO	PLE	ERR	Min	Max
T1	14,3	4,0	1,8	5,3	1,5	8,1	4051	8102
T2	9,9	2,5	1,9	6,5	0,3	7,0	3490	6981
T3	6,8	2,1	1,0	4,4	0,4	4,9	2459	4918
T4	9,1	2,8	0,3	4,1	1,0	4,8	2418	4837
T5	20,3	7,9	0,1	8,5	2,3	11,7	5840	11681
Total	60,4	19,3	5,1	28,9	5,5	36,5	18259	36519

Ces données peuvent être rapprochées de celles obtenues à l'issue de la cartographie des faciès d'écoulement réalisée sur l'Ariège en 2014. Cependant, la classification des faciès utilisée en 2014 était différente de celle utilisée dans cette étude, et seuls les radiers et rapides ont été déterminés à partir des mêmes caractéristiques hydromorphologiques. Les surfaces d'ERR ne pouvant être calculées à partir de la même formule que celle appliquée aux relevés de 2019, seules les surfaces de radiers et de rapides sont présentées ici (Figure 8). Elles permettent de donner une vision générale de l'évolution des principaux faciès favorables à la croissance des juvéniles entre 2014 et 2019 sur le secteur suivi.

Les surfaces de rapides calculées en 2019 sont très proches de celles relevées en 2014. En revanche, les surfaces de radiers relevées cette année sont bien inférieures à celles de 2014 (diminution de 27,6 ha à 19,5 ha). Ces modifications sont strictement localisées au niveau des tronçons 1 et 2 (de Labarre au barrage de la Cavalerie).

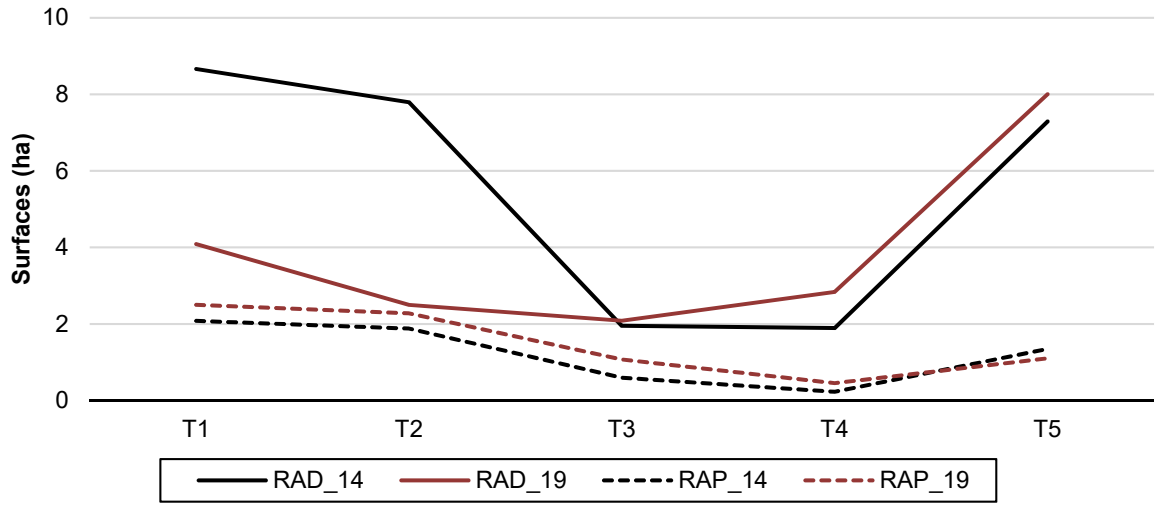


Figure 8 : Evolution des surfaces des radiers et rapides entre 2014 et 2019

3.3 Habitats types des saumons adultes

3.3.1 Zones potentielles de reproduction

Sur l'ensemble du linéaire prospecté, 19 zones de frayères potentielles (ZPF) ont été identifiées. Leur localisation générale est présentée dans la Figure 9 et une cartographie plus détaillée est disponible en Annexe 1.

Leurs caractéristiques sont synthétisées dans le Tableau 8 ci-dessous. Les surfaces de ZPF identifiées sont hétérogènes et vont de 27,5 m² jusqu'à 425,6 m² (ZPF localisée 230 m en amont du pont de Vernet).

Elles ne semblent pas réparties de façon homogène sur le linéaire, tant en termes d'occurrence (nombre de ZPF vis-à-vis de la longueur des tronçons) qu'en termes de surface (surface des ZPF en rapport de la surface totale de chaque tronçon). De manière générale, le tronçon 4 est celui où les ZPF semblent plus fréquentes et mieux représentées en surface.

Toutefois, notons que les surfaces représentées par les ZPF sont globalement très faibles. En effet, elles varient entre 0,07 et 0,32 % selon le tronçon.

Tableau 8 : Bilan des surfaces de frayères potentielles

N° tronçon	Longueur (km)	Nombre de frayères	Surface totale (m²)	% de la surface totale	Surface min (m²)	Surface max (m²)
T1	14,3	2	475,6	0,07	176,4	299,2
T2	9,9	4	687,0	0,16	27,9	269,8
T3	6,8	4	345,0	0,17	27,5	220,9
T4	9,1	5	1165,8	0,32	86,0	425,6
T5	20,3	4	745,8	0,07	120,0	371,5
Total	60,4	**19**	**3419,3**	0,13		

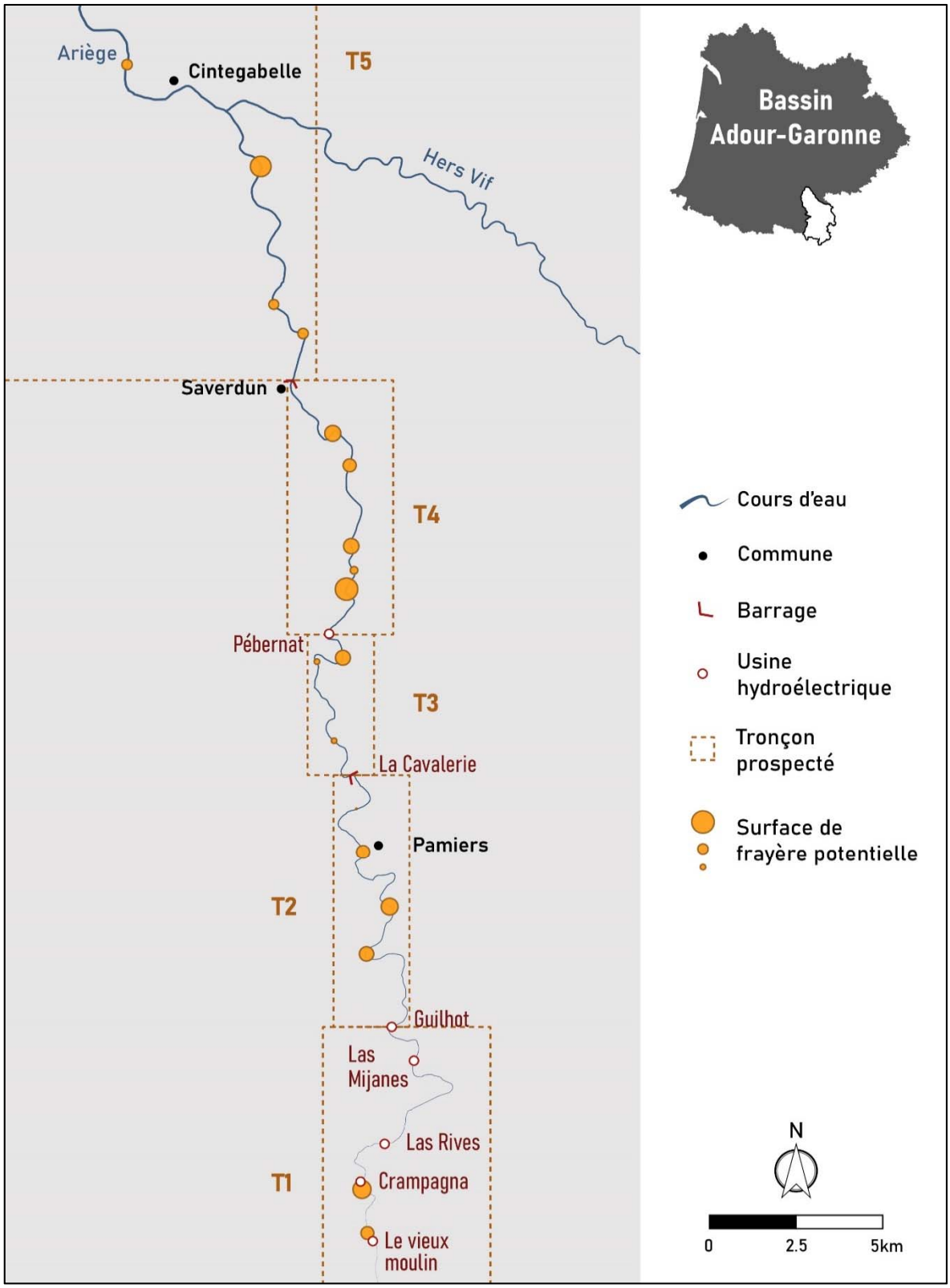


Figure 9 : Localisation des zones de frayères potentielles

Outre les surfaces potentielles et leur répartition le long des secteurs suivis, la composition granulométrique des ZPF est un élément important à prendre en compte (Figure 10). La fraction granulométrique dominante est globalement dominée par les cailloux grossiers, et plus rarement par les pierres fines. Ces granulométries sont optimales au regard des exigences du saumon, ce qui est cohérent compte tenu du protocole d'inventaire appliqué ici.

Concernant les granulométries secondaires, les classes répertoriées sont plus variées et s'étendent du gravier grossier à la pierre grossière. Cette dernière est uniquement retrouvée dans le tronçon 4.

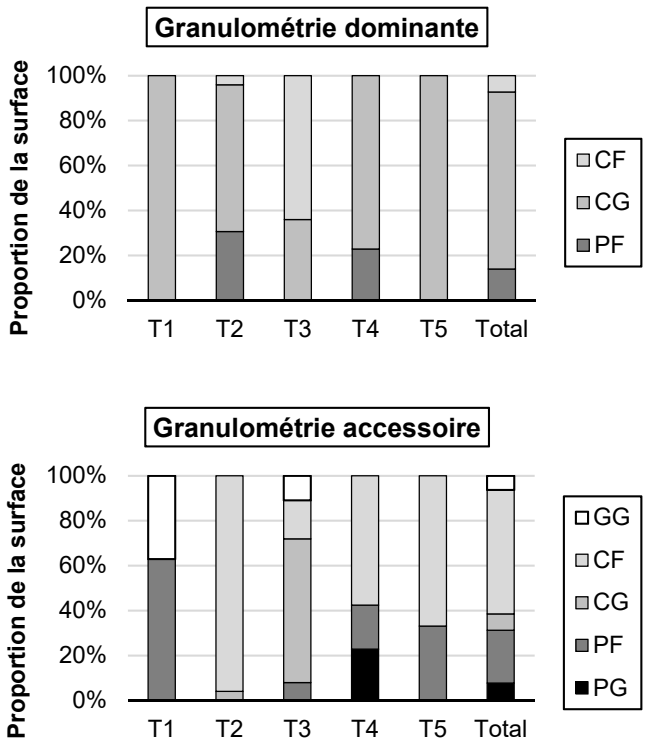


Figure 10 : Composition granulométrique des zones de frayères potentielles

3.3.1 Zones potentielles de refuge (pré-frai)

Les zones potentielles de refuge correspondent à des zones d'eau calmes et profondes (supérieures à 90 cm) et sont donc localisées dans des faciès d'écoulement de type chenal lentique ou mouille de concavité. Leur localisation précise est disponible dans l'atlas cartographique en Annexe 1.

A l'échelle du linéaire étudié, ces zones de repos potentielles semblent abondantes et réparties de façon assez homogène. Selon le tronçon considéré, elles représentent entre 29 et 49 % de la surface. De plus, la végétation rivulaire dense sur tout le linéaire cartographié offre globalement de nombreuses zones d'ombre.

Notons toutefois qu'une certaine proportion des zones décrites comme refuges potentiels présente des marnes en granulométrie dominante. En effet, les marnes sont présentes sur 38 % de la surface identifiée comme refuge dans le tronçon 4, et 82% dans le tronçon 5 (Annexe 3). Ces surfaces à marnes constituent probablement des refuges de moindre qualité pour les saumons adultes.

3.4 Analyse des températures sur le secteur suivi

Les courbes d'évolution des températures utilisées dans les traitements présentés ci-après sont disponibles en Annexe 4.

La Figure 11 ci-dessous présente la répartition en classes de températures des données instantanées enregistrées sur l'Ariège à Foix durant la période de croissance des juvéniles (avril à octobre). Les températures horaires enregistrées varient entre 1,9 et 19,3°C, et sont à 95 % comprises entre 4 et 18°C.

A l'échelle journalière, l'amplitude thermique maximale enregistrée était de 17°C en 2017 (Tableau 9). Les moyennes journalières varient entre 2,2 et 18,6°C selon la période et l'année considérée. Enfin, la température moyenne calculée sur les moyennes journalières des 30 jours consécutifs les plus chauds varie entre 15,7 et 16,8°C.

De manière générale, les températures enregistrées sur le secteur suivi se situent dans la partie basse de la fourchette des températures données comme optimales pour la croissance des juvéniles de saumon (entre 16 et 20°C). Néanmoins, elles se situent largement en dehors des bornes définies comme stressantes voire létales vis-à-vis de ces jeunes stades de développement (7 et 21°C).

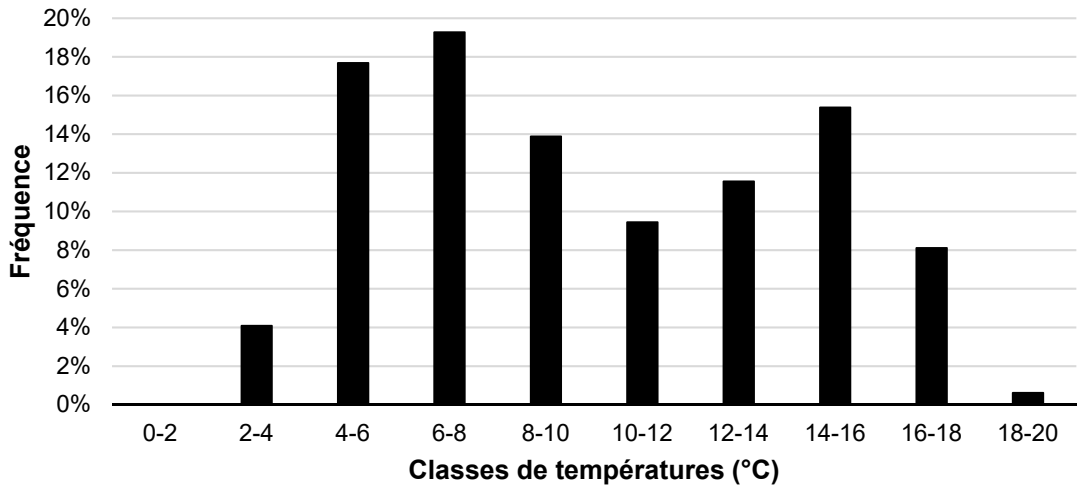


Figure 11 : Répartition des températures horaires enregistrées à Foix pendant la période de croissance des juvéniles de saumon entre 2016 et 2019

Tableau 9 : Bilan des indicateurs thermiques généraux calculés à partir de données horaires

Indicateur	2016	2017	2018	2019
Ti min	2,9	1,9	2,9	2,8
Ti max	18,6	18,9	17,8	19,3
ATi max	15,1	17	14,9	16,5
Tmin	3,7	2,2	3,1	3
Tmax	17,7	17,8	17	18,6
T30	16,2	16,3	15,7	16,8

4. BILAN ET PERSPECTIVES

La campagne de terrain réalisée dans le cadre de cette étude a permis d'actualiser la **cartographie des faciès d'écoulement sur le linéaire de l'Ariège compris entre Labarre et Auterive (soit 60,4 km)**. Elle s'est déroulée dans des conditions optimales d'identification des faciès d'écoulement compte tenu des niveaux d'eau particulièrement bas pour un étiage estival.

Par rapport à la cartographie du même secteur réalisée en 2014, la surface des radiers a diminué de 8,1 ha, et celle des rapides de 1,3 ha. Cette perte de surface de radiers est seulement observée dans le linéaire compris entre Labarre et le barrage de la Cavalerie à Pamiers. De manière générale, davantage de faciès de type chenal lentique et lotique ont été décrits cette année.

Les marnes sont plus fréquentes et apparentes sur le linéaire entre Saverdun et Auterive, et rendent 1 ha de rapides et 1,6 ha de plats courants défavorables à la croissance des juvéniles sur ce secteur.

Finalement, les surfaces utiles à la croissance des juvéniles de saumons, exprimées en Equivalents Radiers-Rapides, **ont été estimées à 36,5 ha**. A partir de cette surface favorable aux juvéniles, ce sont **entre 18 259 et 36 519 smolts** qui pourraient être produits annuellement sur le linéaire étudié.

Concernant les habitats de reproduction, **19 zones potentielles de frayères** ont été inventoriées, et représentent une surface totale de **3 419 m²**, soient **0,13 % de la surface** étudiée.

Les zones potentielles de refuge et de repos pour les adultes en montaison ou en attente du frai sont relativement nombreuses et réparties de façon homogène sur le linéaire étudié. Toutefois, une étude thermique des fosses identifiées cette année permettrait de disposer de plus d'éléments pour valider leur potentialité.

L'analyse des températures de l'eau mesurées pendant la période de croissance des juvéniles sur le secteur au cours des 4 dernières années ne met pas en évidence d'anomalie particulière vis-à-vis des exigences des saumons pour leur croissance.

BIBLIOGRAPHIE

BARDONNET A., BAGLINIERE J.L., 2000. Freshwater habitat of Atlantic salmon (Salmo salar). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 57(2), 497-506.

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.

CAZENEUVE L., LAGARRIGUE T., LASCAUX J.M., 2008. Synthèse des potentialités de production en saumons du bassin de la Dordogne. Rapport n°19D-08-RT, MI.GA.DO.

CORNU V., TEISSIER S., DABOS P., s.d. Analyse de risque saumon atlantique sur le bassin de la Garonne. Note explicative.

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.

DUMOUTIER Q., VIGIER L., CAUDRON A., 2010. Macro Excel d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles, MACMASalmo1.0. *Rapport SHL293.2010 / FDP74.10/03*

GAYOU F., 1986. Possibilités de restauration du saumon atlantique et de l'alose dans le bassin de la Garonne. Rapport de synthèse C.S.P. DR n°7, 87p.

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

HEGGENES J., SALTVEIT S.J., 1990. Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and brown trout, *Salmo trutta* L., in a Norwegian river. *Journal of Fish Biology*. 36(5), 707-720.

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.

HELAND M., GAUDIN P., BARDONNET A., 1995. Mise en place des premiers comportements et utilisation de l'habitat après l'émergence chez les salmonidés d'eau courante. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 337/338/339 : 191-197.

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.

JONSSON B., FORSETH T., JENSEN A.J., NÆSJE T.F., 2001. Thermal performance of juvenile Atlantic Salmon, Salmo salar L. *Functional Ecology*, 15(6), 701-711.

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., 1989. Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie*. Bull. Fr. Pêche Piscic*. 315 : 189-210.

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.

MALAVOI J.-R., SOUCHON Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (365-366), 357-372.

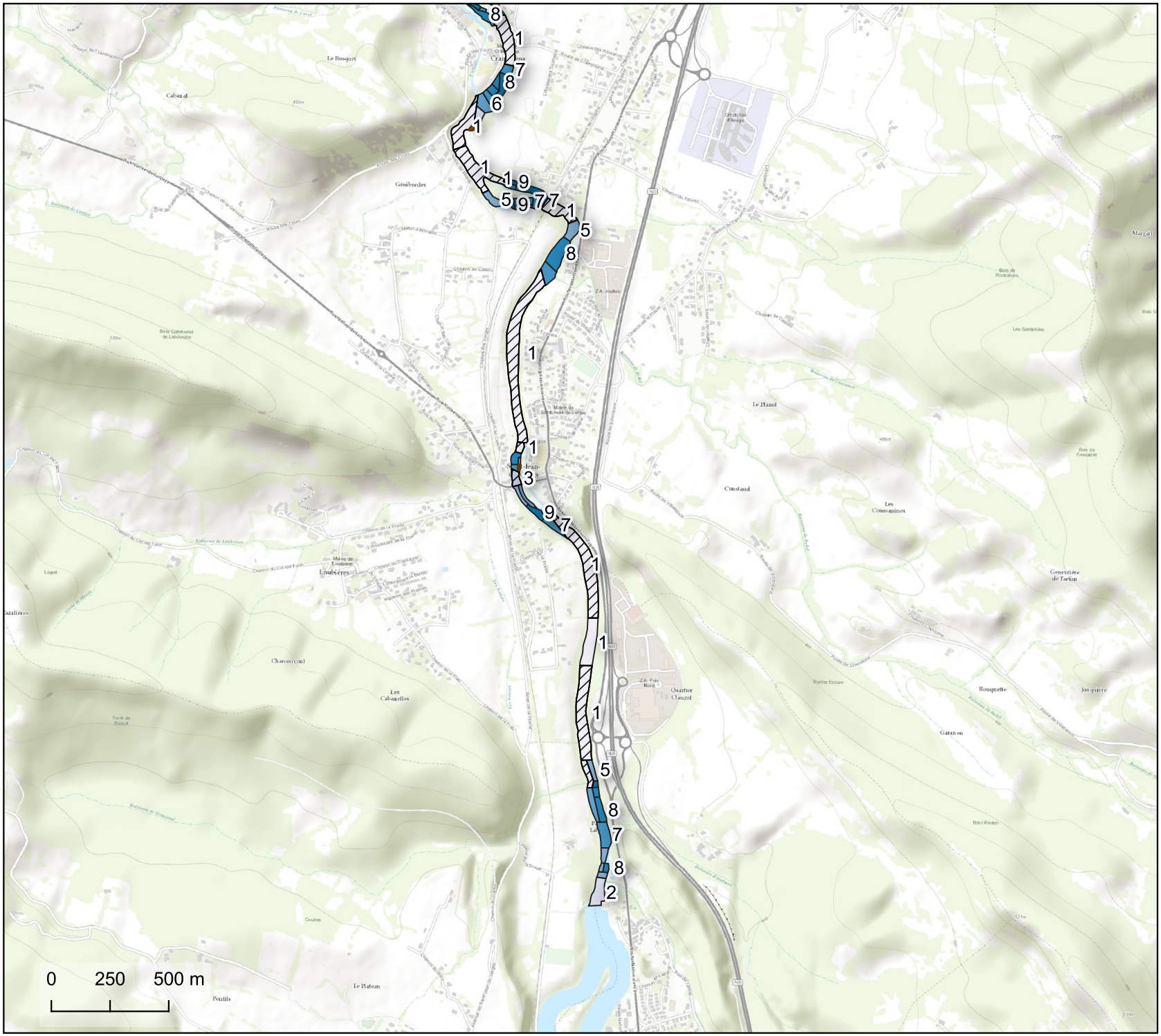
MOIR H. J., SOULSBY C., YOUNGSON A., 1998. Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by Atlantic salmon for spawning in the Girnock Burn, Scotland. *Fisheries Management and Ecology*, vol. 5, no 3, p. 241-254.

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.

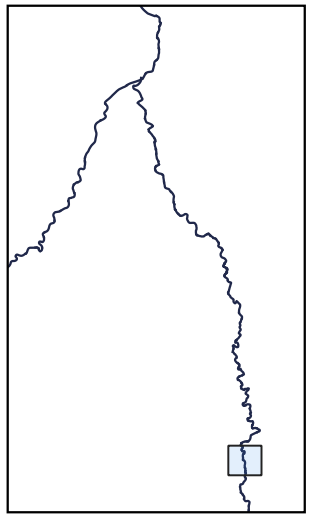
ANNEXES

Annexe 1 : Cartographie des faciès d'écoulement et des zones potentielles de frayères

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



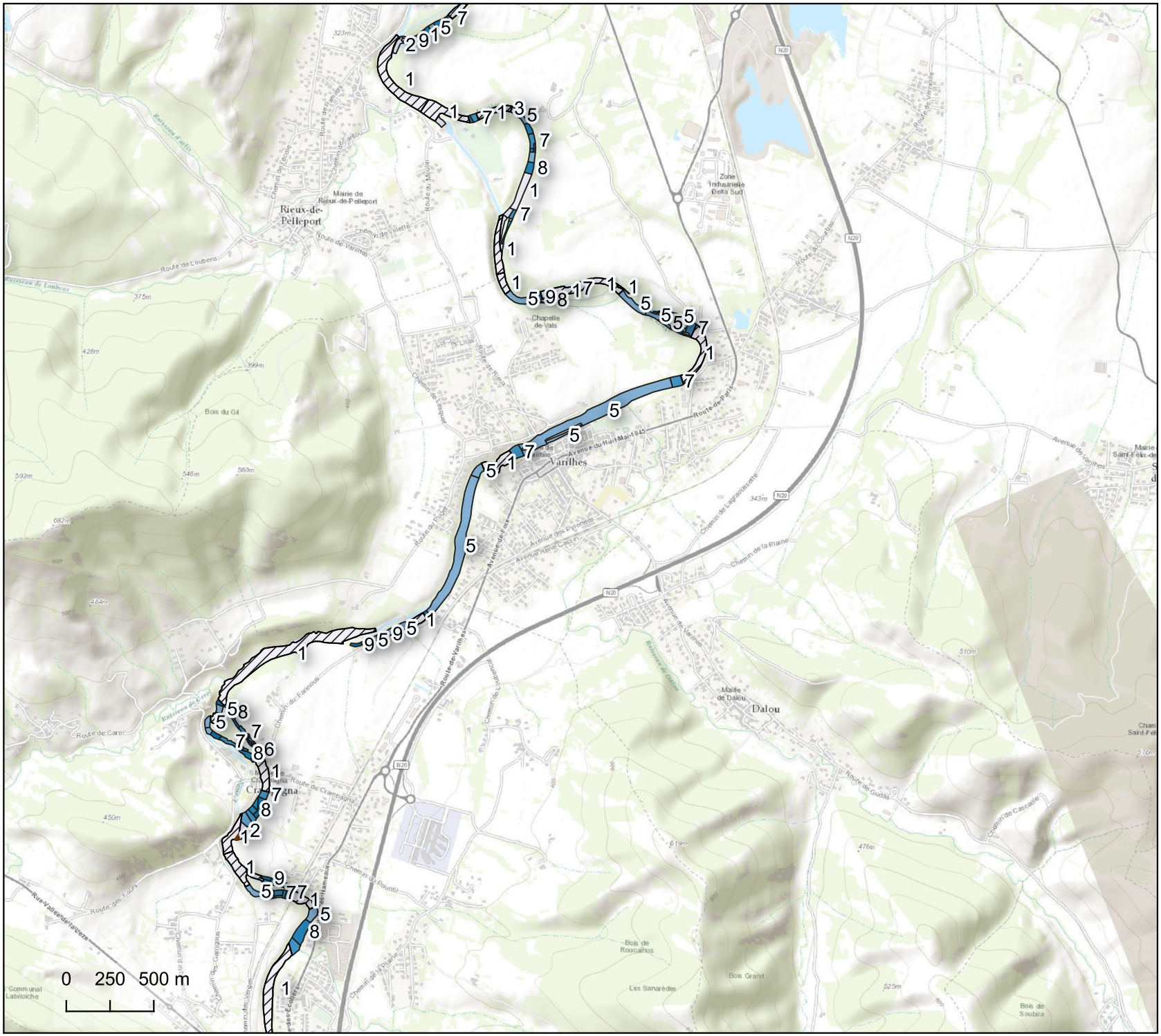
Frayère potentielle

Refuge potentiel

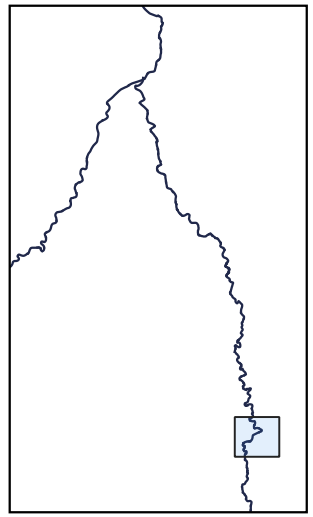
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



Frayère potentielle

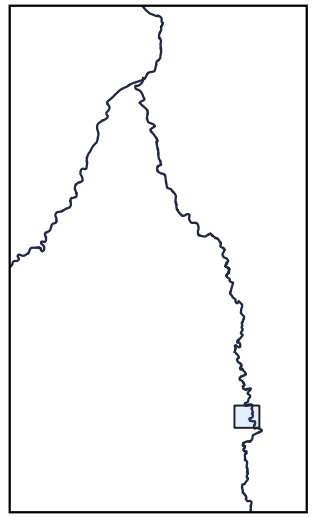
Refuge potentiel

Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)

Localisation générale



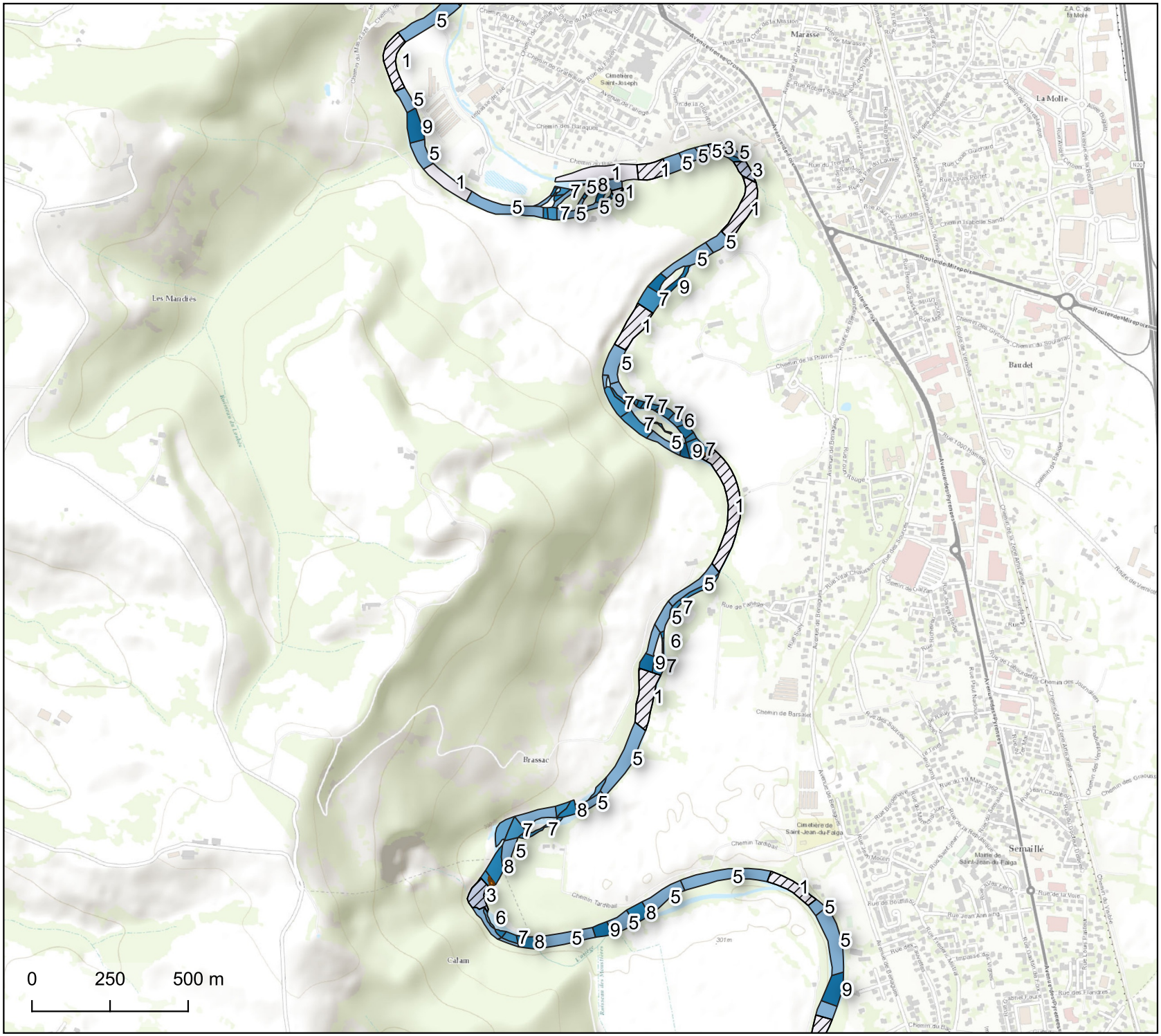
- Frayère potentielle
- Refuge potentiel

Faciès d'écoulement

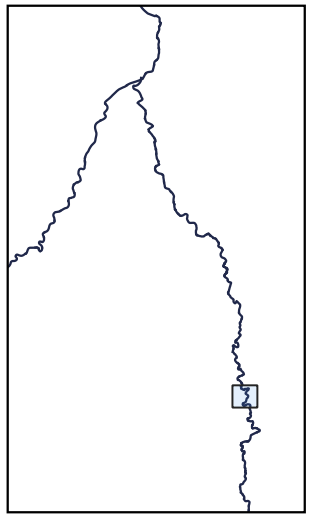
- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

0 250 500 m

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale

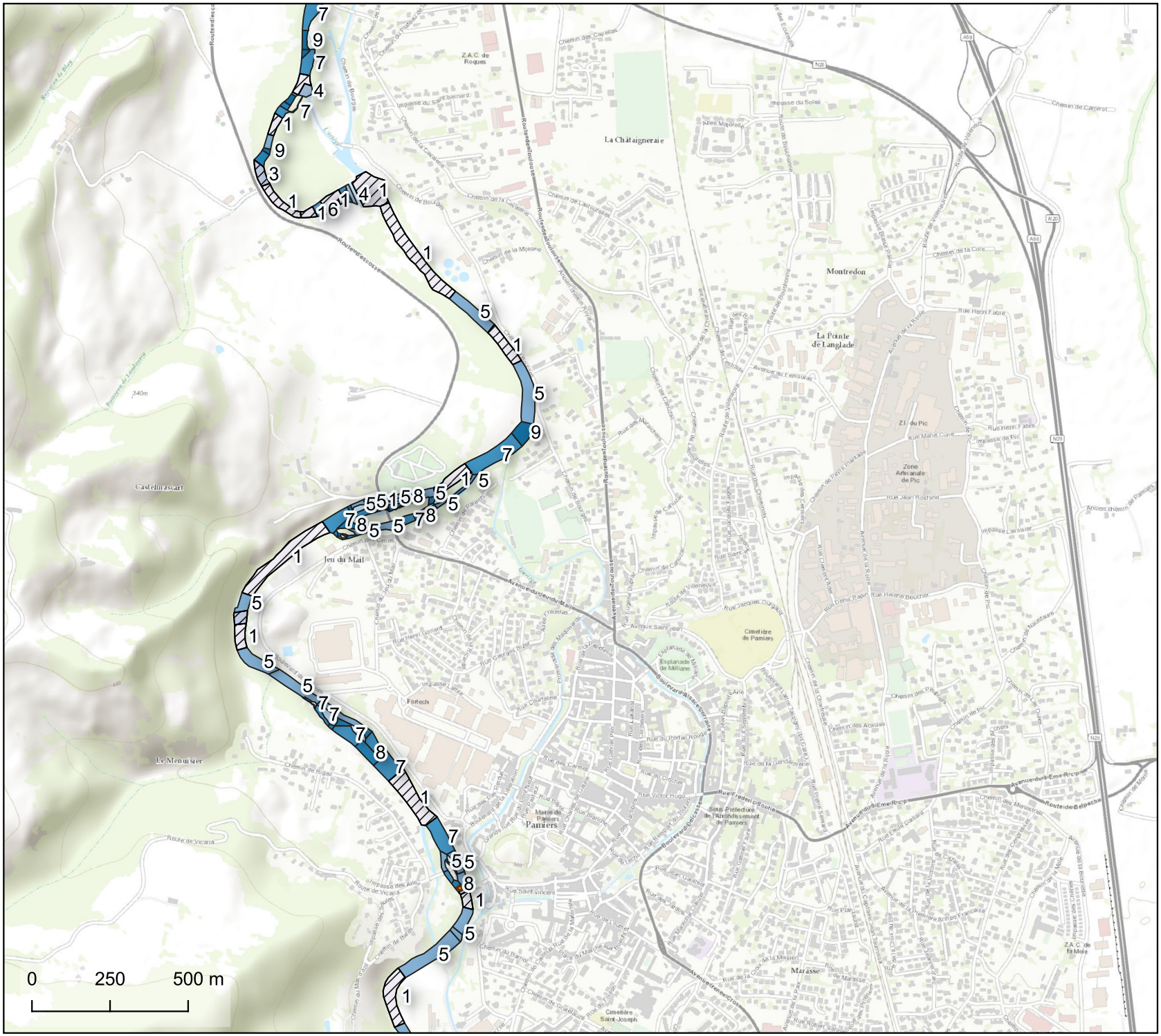


- Frayère potentielle
- Refuge potentiel

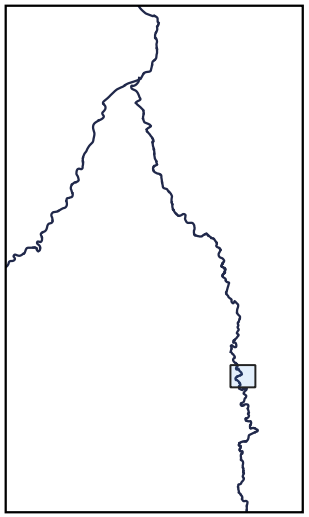
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale

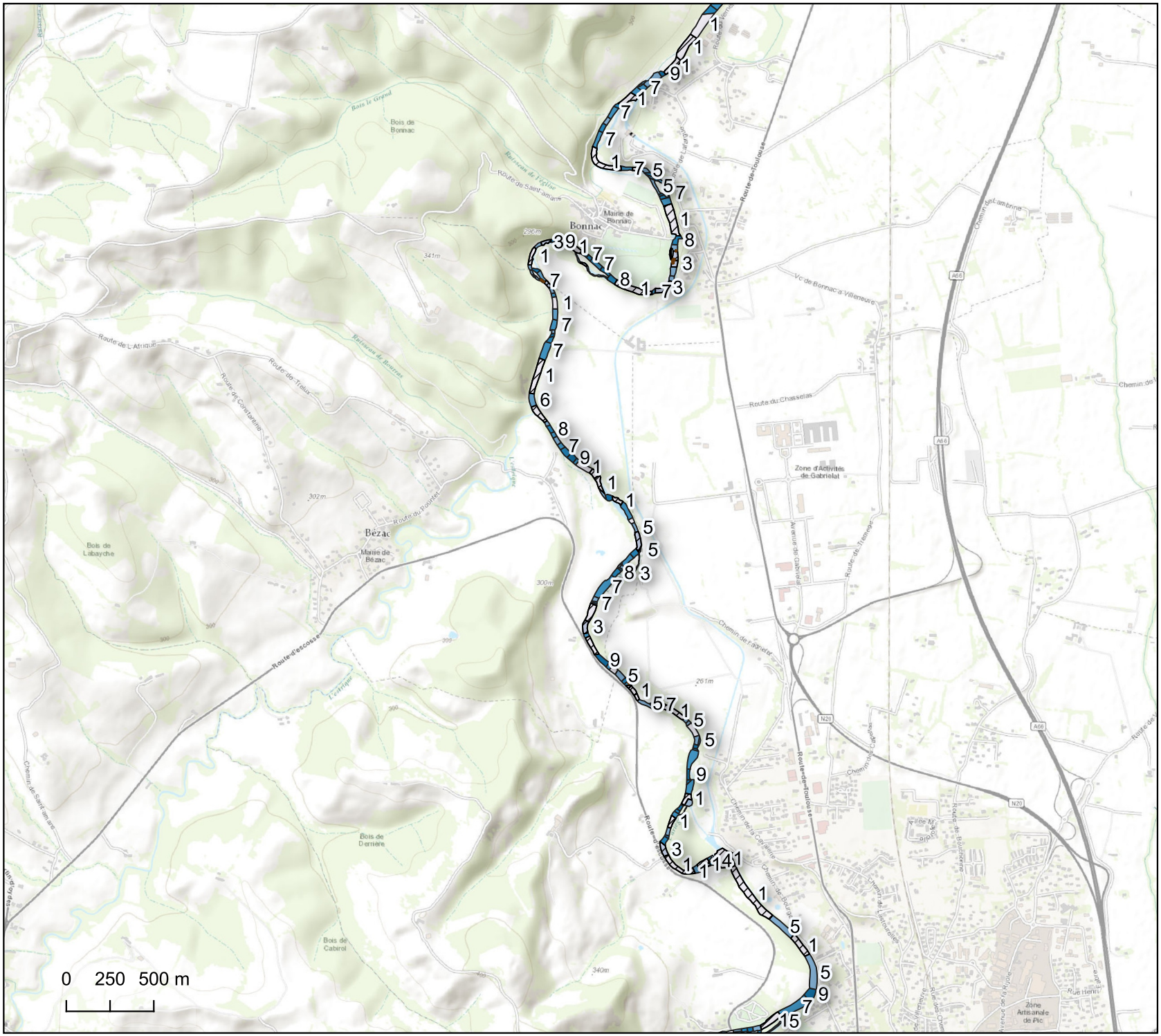


- Frayère potentielle
- Refuge potentiel

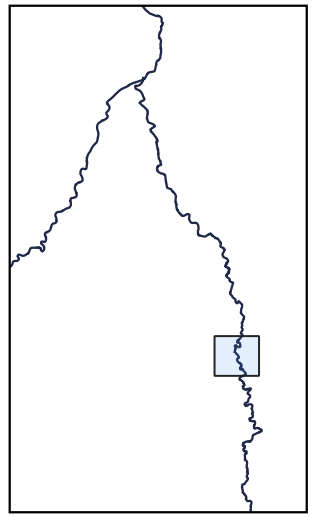
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale

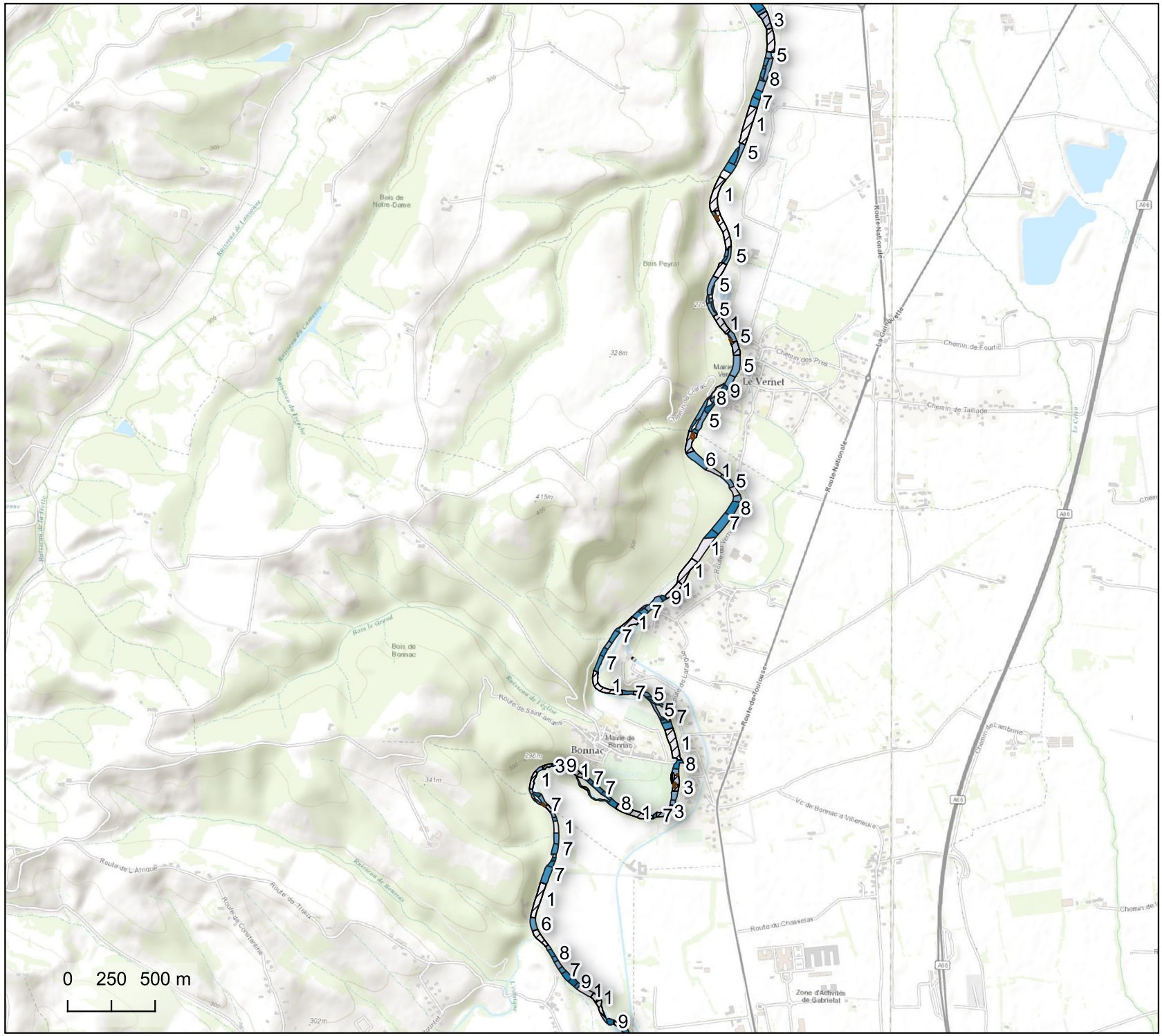


- Frayère potentielle
- Refuge potentiel

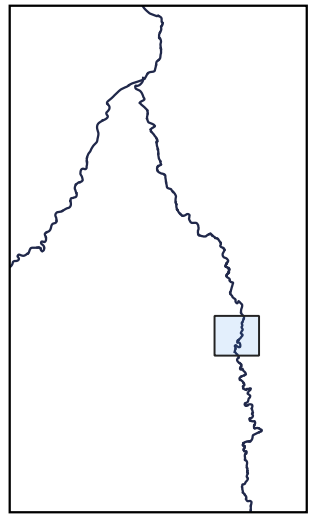
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale

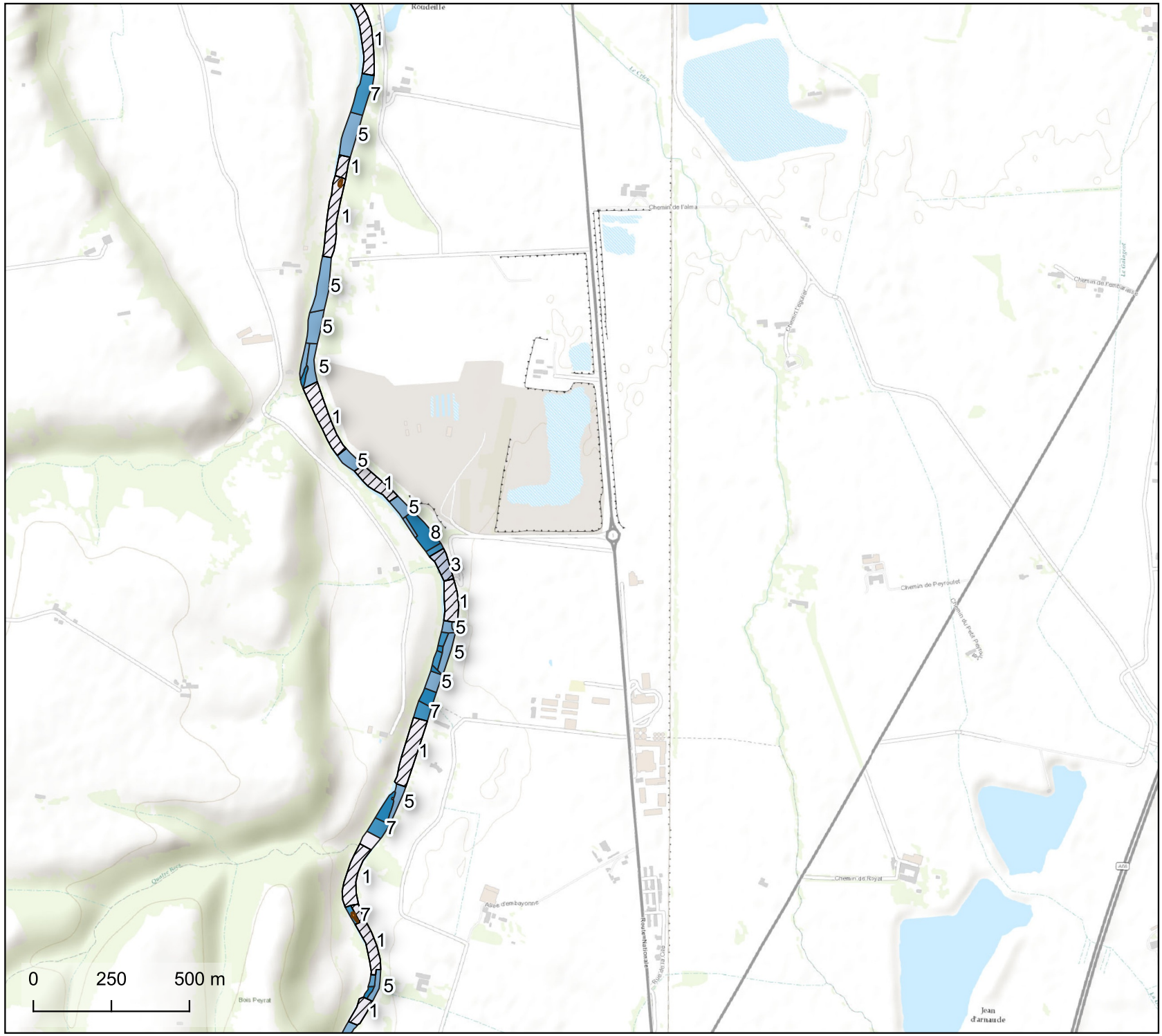


- Frayère potentielle
- Refuge potentiel

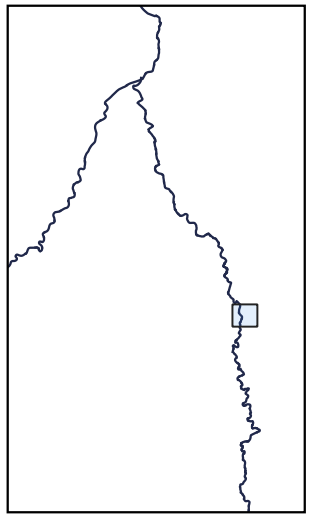
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



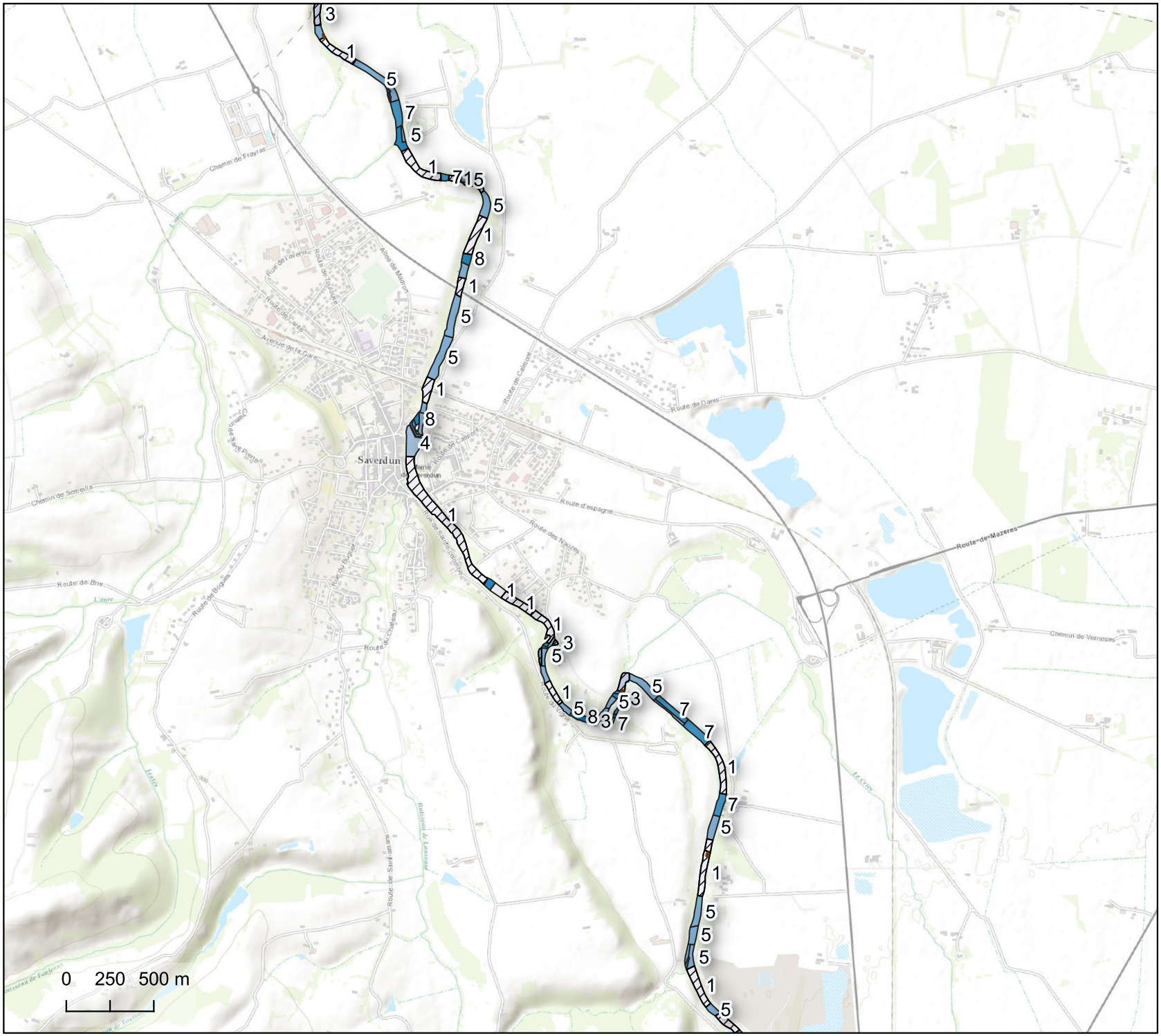
Frayère potentielle

Refuge potentiel

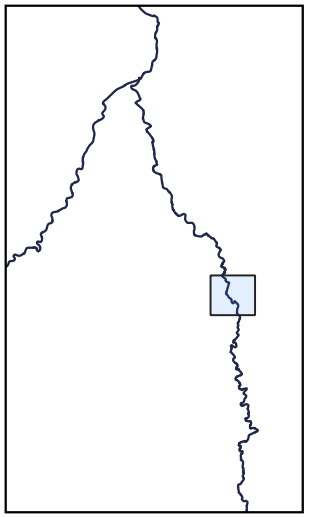
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



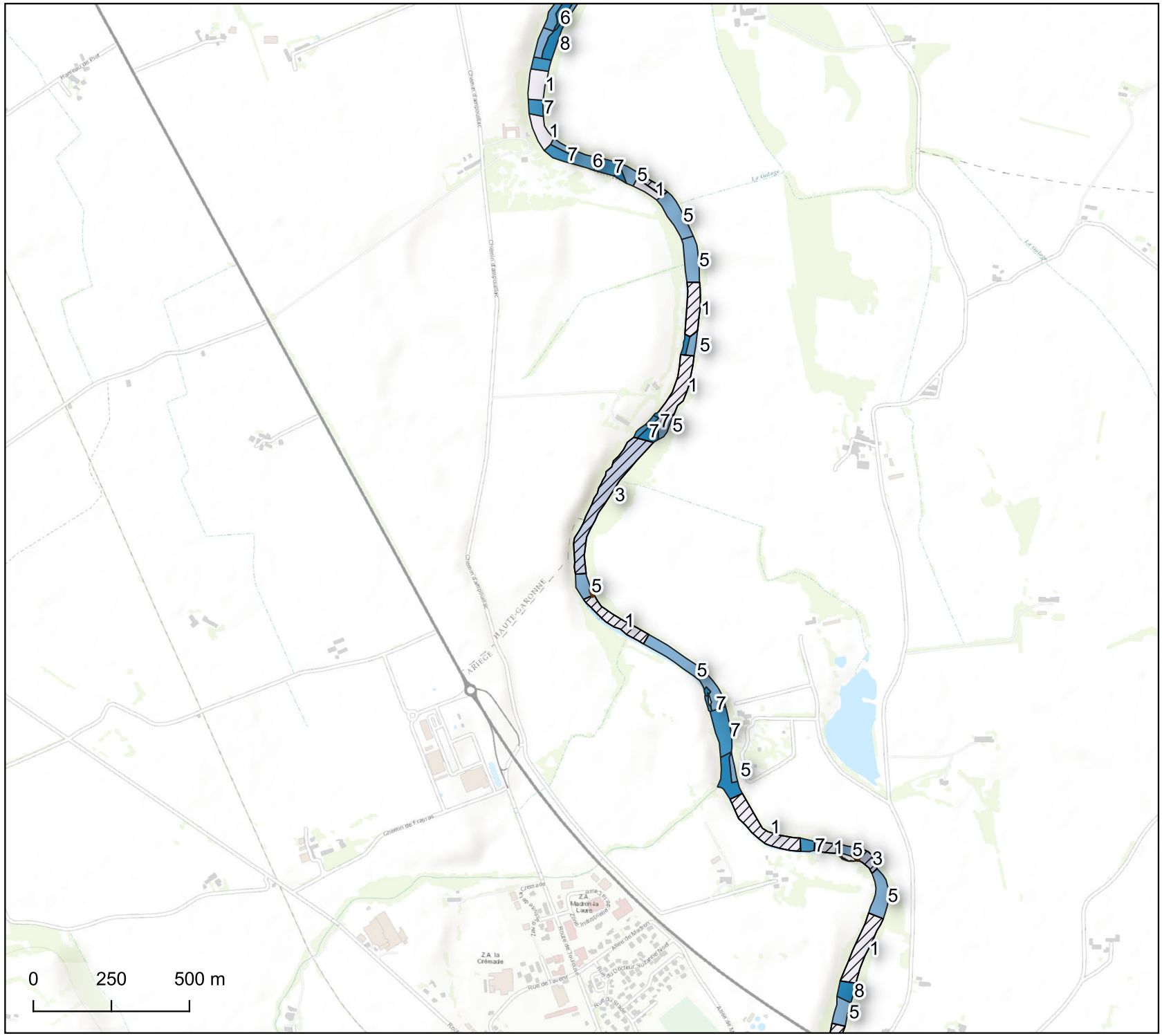
Frayère potentielle

Refuge potentiel

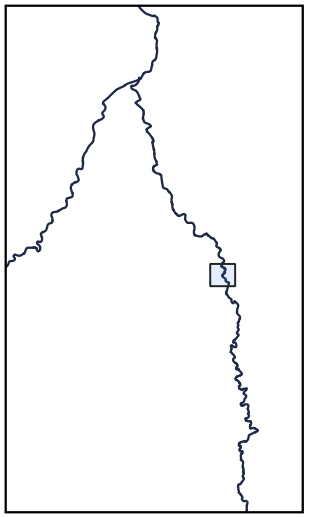
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



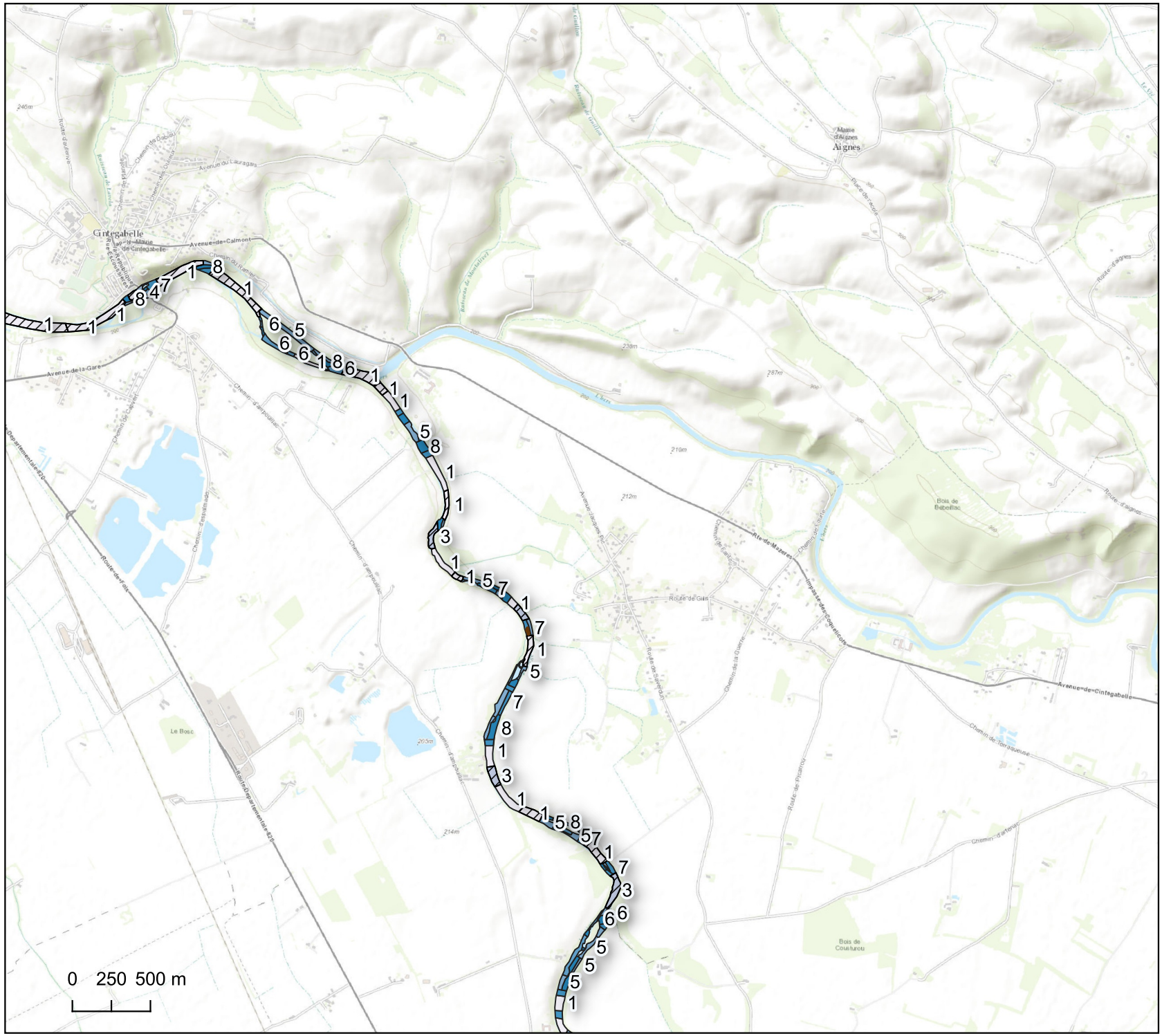
Frayère potentielle

Refuge potentiel

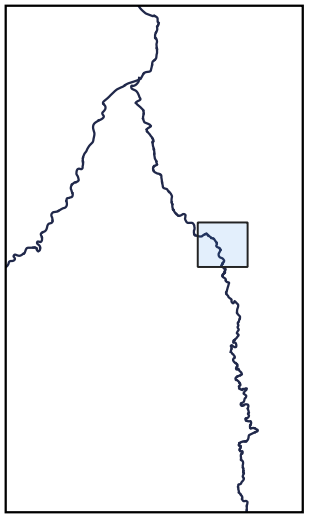
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



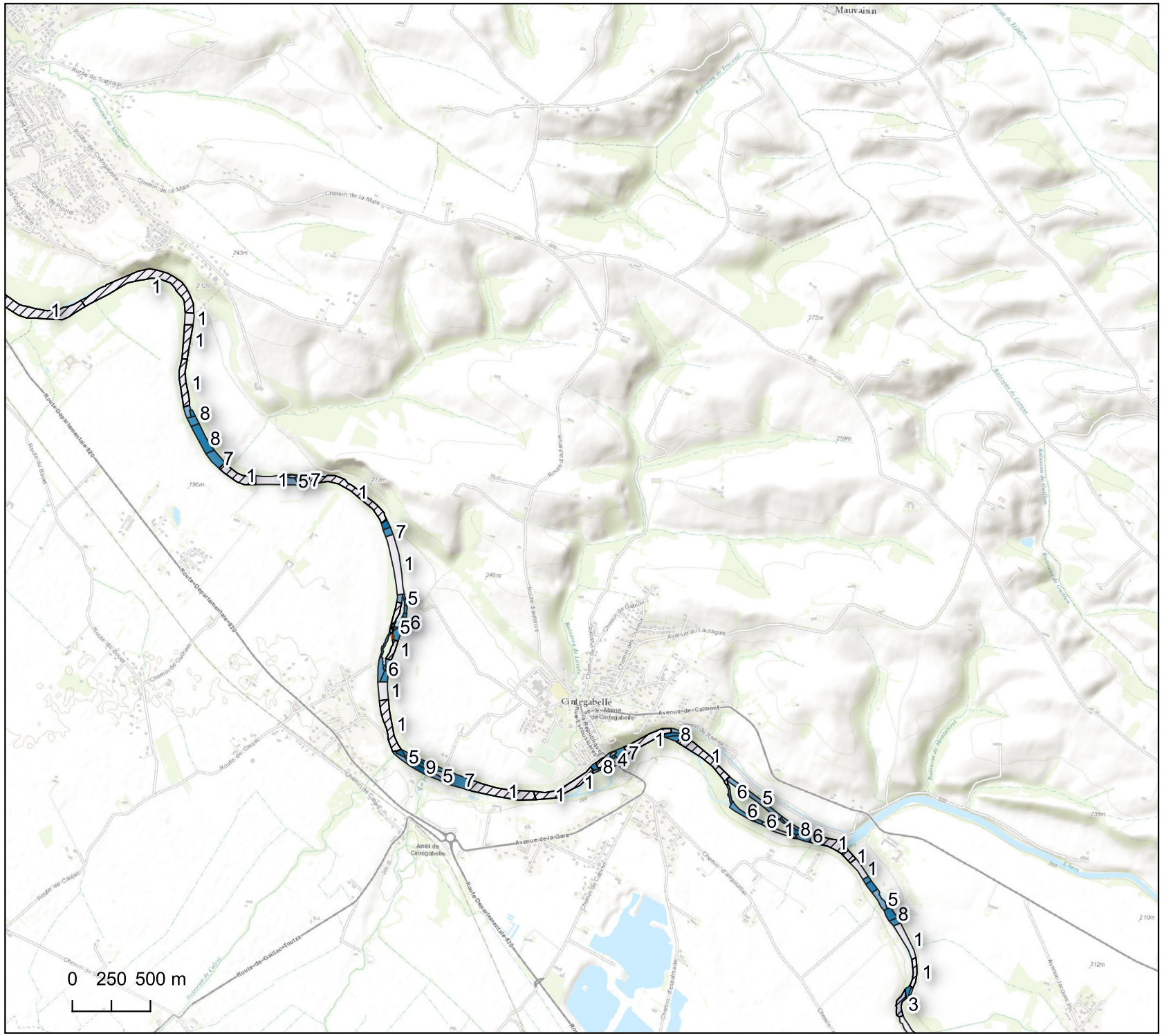
Frayère potentielle

Refuge potentiel

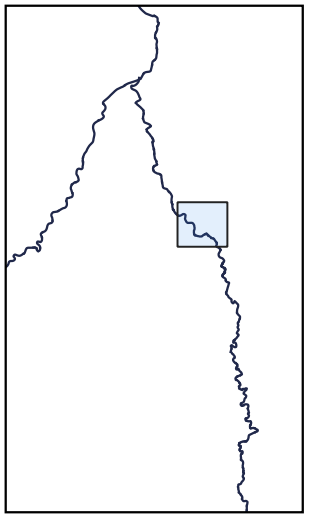
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



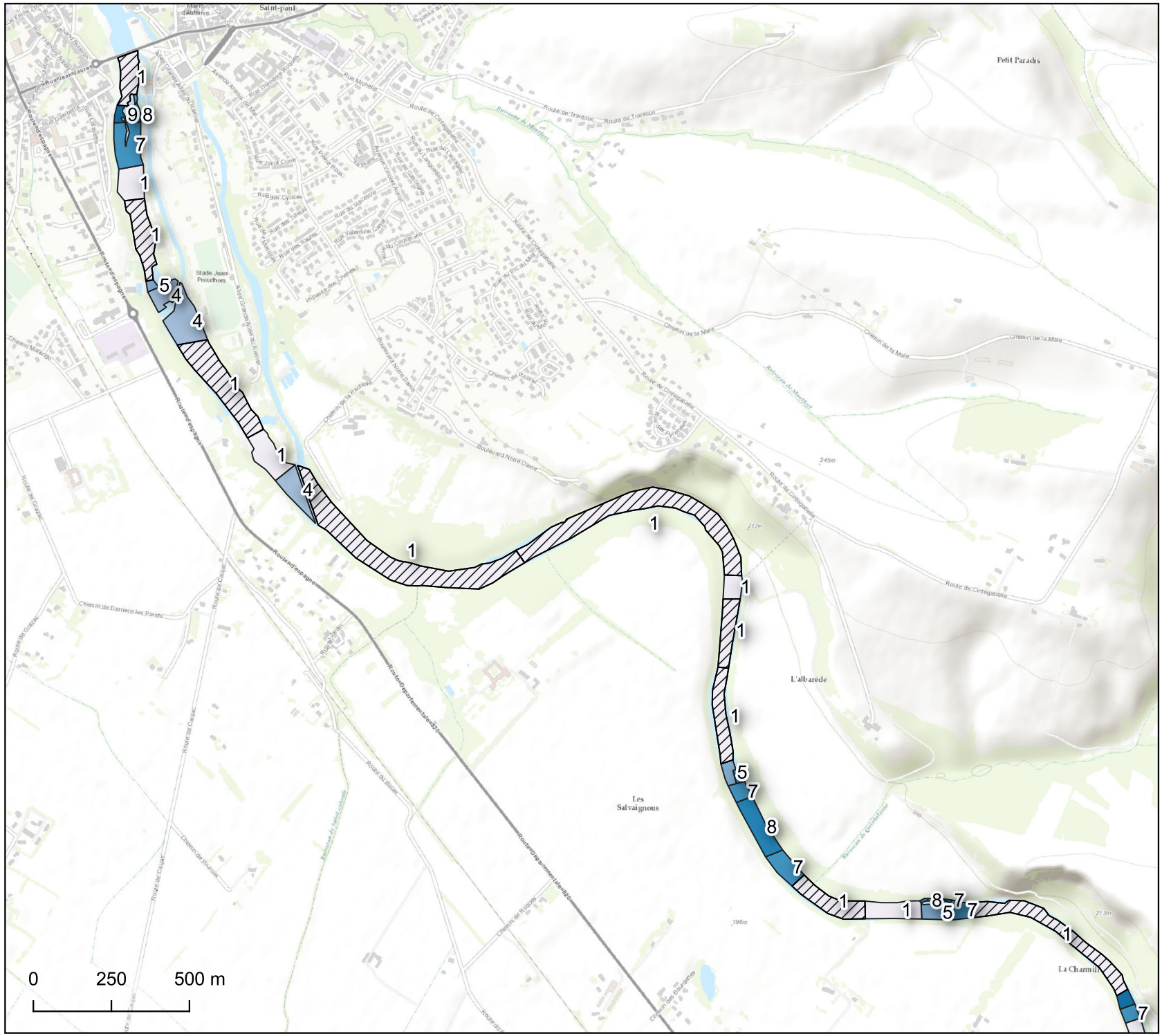
Frayère potentielle

Refuge potentiel

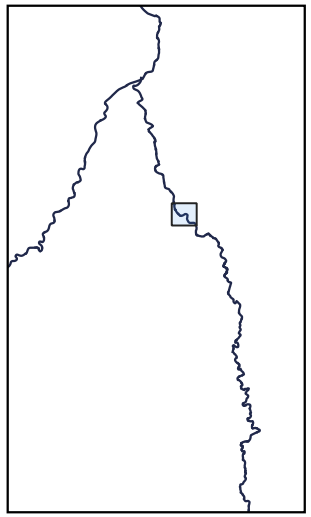
Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Cartographie des faciès d'écoulement sur l'Ariège (2019)



Localisation générale



Frayère potentielle

Refuge potentiel

Faciès d'écoulement

- 1_CLE
- 2_FDI
- 3_MOU
- 4_FDA
- 5_CLO
- 6_PLE
- 7_PCO
- 8_RAD
- 9_RAP

Annexe 2 : Surfaces des faciès présentant les marnes comme classe granulométrique dominante ou accessoire

Tronçon	Surface (ha)	Surface (ha) des faciès avec des marnes en granulométrie dominante								
		RAD	RAP	PCO	PLE	CLO	CLE	MOU	FDI	FDA
T1	67,0			0,2	0,1	0,4	0,5		0,3	
T2	42,6					0,4	0,2	0,0		0,0
T3	20,1				0,2	0,4	1,0	0,1		
T4	36,6		0,2	0,1	0,0	3,5	5,8	0,4		
T5	99,6	0,1	1,0	1,6	1,8	8,9	38,2	2,7		0,5
Total	265,9	0,1	1,2	1,9	2,1	13,6	45,6	3,2	0,3	0,5

Tronçon	Surface (ha)	Surface (ha) des faciès avec des marnes en granulométrie accessoire								
		RAD	RAP	PCO	PLE	CLO	CLE	MOU	FDI	FDA
T1	67,0		0,1							
T2	42,6					0,8	1,5			
T3	20,1			0,5		0,4	1,6			
T4	36,6					1,0	4,7	0,4		
T5	99,6	0,1	0,1	0,2	0,3	1,8	8,2	0,1		
Total	265,9	0,1	0,2	0,8	0,3	4,0	16,1	0,4	0,0	0,0

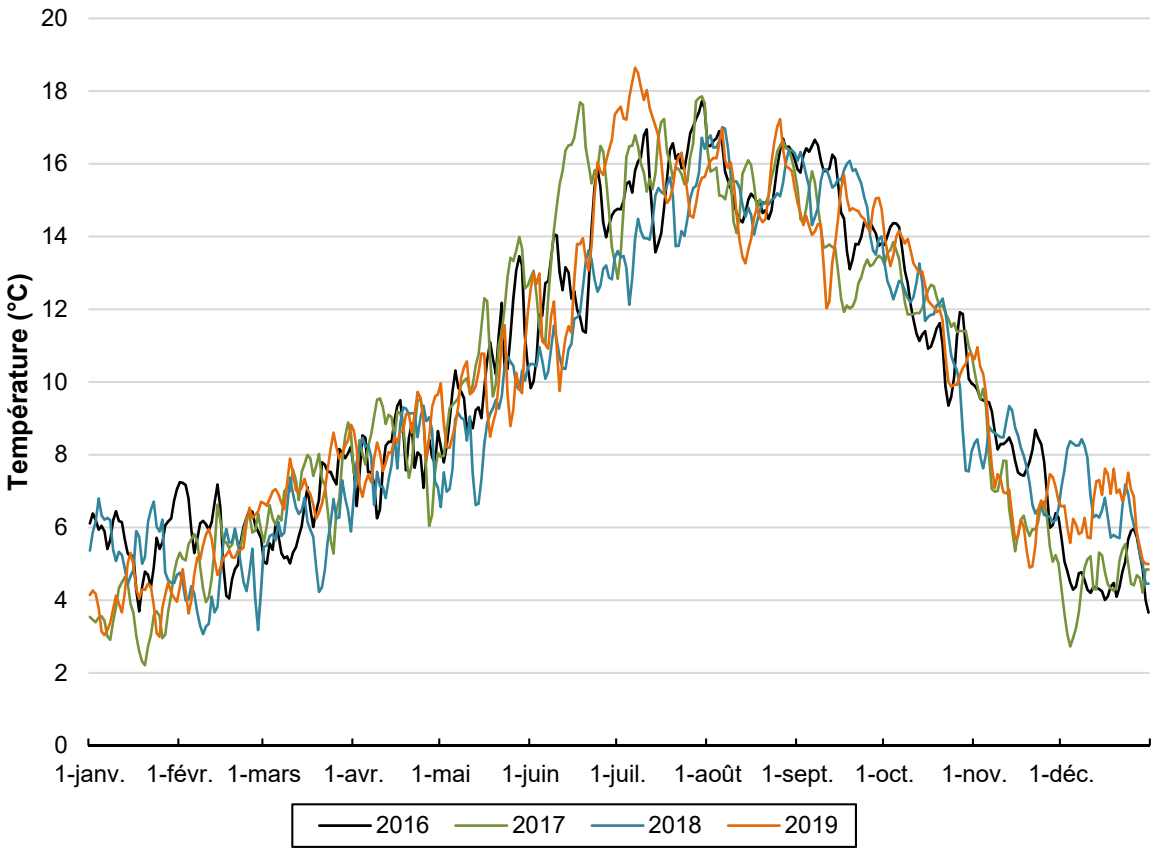
Annexe 3 : Composition granulométrique des zones identifiées comme refuges potentiels

Rappelons que les surfaces présentées ci-dessous correspondent aux surfaces totales des faciès d'écoulement pour lesquels chacune des classes granulométriques ont été identifiées comme dominantes.

Tronçon	R	B	PG	PF	CG	GF	SG	SF	L	Total
1		2,3	21,4	6,0	2,8					**32,9**
2		0,7	2,9	7,1	0,7				0,9	**12,4**
3		0,2	1,2	3,7	0,7	0,0	0,8	0,7		**8,3**
4			1,5	7,9	0,8		0,0	0,0		**16,3**
5			0,3	3,9	0,9		3,5			**46,2**
Total		3,2	27,2	28,5	5,9	0,0	4,3	0,7	0,9	**116,2**

R : rocher, B : bloc, PG : pierre grossière, PF : pierre fine, CG : cailloux grossier, GF : gravier fin, SG : sable grossier, SF : sable fin, L : limon

Annexe 4 : Evolution des températures sur l'Ariège à Foix, comparaison des données entre 2016 et 2019



VOLET 3 : SUIVI DU REGIME THERMIQUE GARONNE-PIQUE-NESTE D'AURE-ARIEGE

SOMMAIRE

LISTE DES ILLUSTRATIONS III

1. INTRODUCTION 1

2. MATERIEL ET METHODE 2

2.1 PROTOCOLE DE SUIVI THERMIQUE ET LOCALISATION DES STATIONS 2
2.2 TRAITEMENT DES DONNEES 3

3. RESULTATS 5

3.1 VALIDATION DES DONNEES 5
3.2 TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES 5
3.3 INDICATEURS THERMIQUES 8

4. BILAN ET PERSPECTIVES 10

5. BIBLIOGRAPHIE 11

ANNEXES 12

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : Localisation des stations 3
Figure 2 : Evolution des températures moyennes journalières sur l'Ariège en 2019 6
Figure 3 : Evolution des températures moyennes journalières sur la Garonne en 2019 6
Figure 4 : Evolution des températures moyennes journalières sur la Neste en 2019 7
Figure 5 : Evolution des températures moyennes journalières sur la Pique en 2019 7
Figure 6 : Températures instantanées minimales, maximales et amplitudes journalières maximales enregistrées sur les stations suivies en 2019 8
Figure 7 : Températures journalières moyennes minimales, maximales et moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds sur les stations suivies en 2019 9

TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des stations de suivi thermique 2
Tableau 2 : Synthèse des indicateurs thermiques calculés et de leur désignation 4

ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse de la donnée disponible sur les stations suivies en 2019 13
Annexe 2 : Evolutions des températures moyennes journalières sur la Garonne en 2019 - Chroniques incomplètes 14
Annexe 3 : Synthèse des indicateurs calculés sur les stations présentant des chroniques complètes pour 2019 15

1. INTRODUCTION

La température de l'eau étant un facteur limitant de la qualité d'un milieu vis-à-vis des populations de saumons, le régime thermique des cours d'eau apparaît alors comme un facteur important à prendre en compte vis-à-vis des opérations de repeuplement.

Les suivis thermiques ont été généralisés par MIGADO dans le cadre des différentes actions menées en faveur des poissons migrateurs sur la plupart des cours d'eau du bassin de la Garonne depuis 2004. Pour chaque axe et portion de cours d'eau, les stations ont été positionnées de manière à pouvoir appréhender les variations de température entre l'amont et l'aval ainsi que l'influence des principaux apports des affluents ou des retenues de barrages.

Ce rapport consiste en une synthèse des données de températures mesurées en 2019 sur la Garonne, la Pique, la Neste et l'Ariège.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 Protocole de suivi thermique et localisation des stations

Le suivi thermique du bassin de la Garonne est réalisé sur un total de 18 stations dont 9 sont localisées sur la Garonne (du Plan d'Arem jusqu'à la centrale hydro-électrique de Golfech), 5 sur l'Ariège, 2 sur la Neste et 2 sur la Pique. La localisation des stations est présentée dans la Figure 1, et le Tableau 1 précise leurs caractéristiques.

Tableau 1 : Caractéristiques des stations de suivi thermique

Cours d'eau	Station	Localisation
Ariège	Bompas	Pleine eau
	Foix	Pleine eau
	Varilhes	Pleine eau
	Saverdun	Pleine eau
	Lacroix-Falgarde	Pleine eau
Garonne	Plan d'Arem	Pleine eau, dans le tronçon court-circuité
	Saint Béat	Pleine eau
	Fronsac	Pleine eau
	Loures-Barousse	Pleine eau
	Valentine	Pleine eau
	Carbonne	Dans le canal de transfert des poissons
	Le Bazacle	Dans un bassin de la passe à bassins successifs
	Verdun-sur-Garonne	Pleine eau
	Golfech	Dans le canal de transfert, non influencée par les rejets de refroidissement des réacteurs nucléaires. En aval de la confluence avec le Tarn
Neste	Arreau	Pleine eau
	Aventignan	Pleine eau
Pique	Cier de Luchon	Pleine eau
	Marignac	Pleine eau

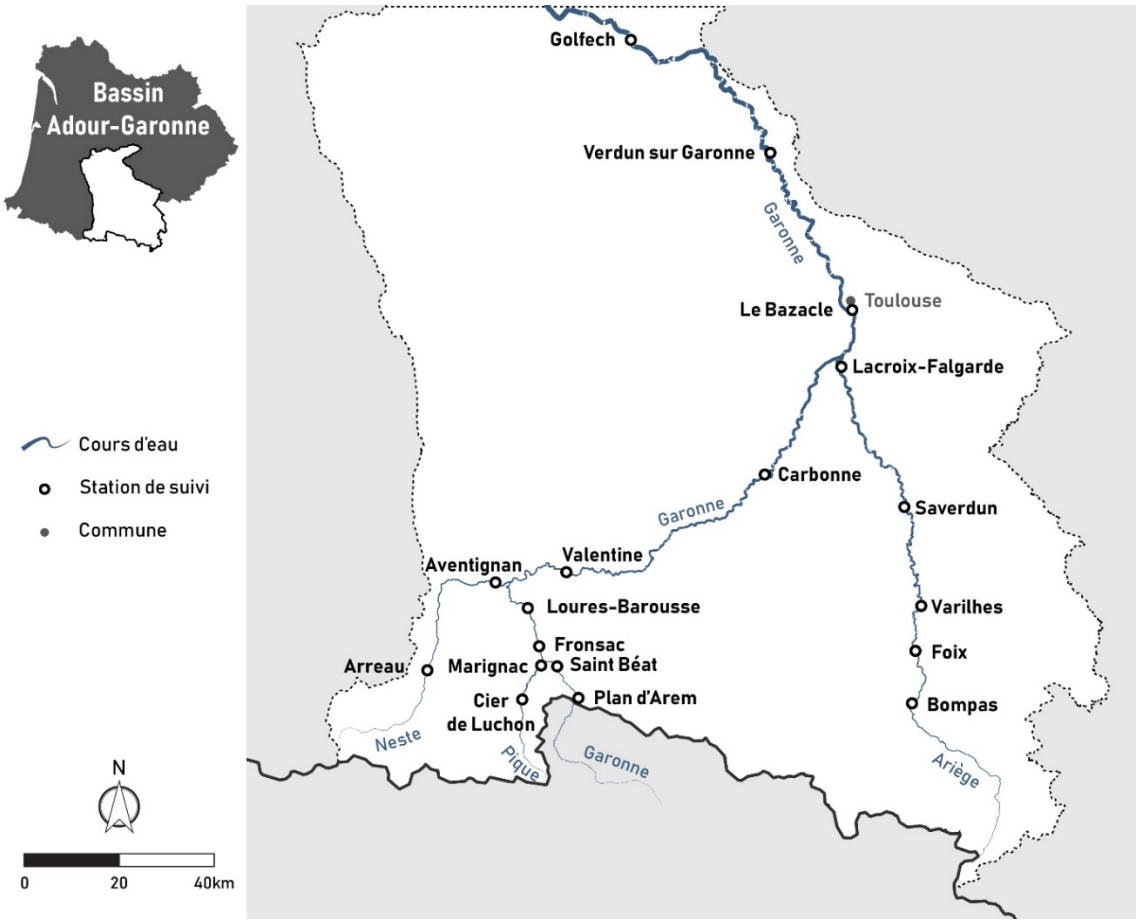


Figure 1 : Localisation des stations

Les données thermiques sont enregistrées pour chaque station sur un cycle annuel complet au pas horaire à l'aide d'une sonde thermique Tinytag Aquatic 2 de type TG-4100. Les données de chaque thermographe sont déchargées en moyenne trois fois par an (fin du printemps, de l'été et de l'hiver). Cette périodicité permet, en cas de dysfonctionnement ou de perte du thermographe, de conserver une partie des données de l'année en cours.

2.2 Traitement des données

L'ensemble des données recueillies est soumis à vérification afin de s'assurer de la cohérence des valeurs enregistrées.

Afin de décrire le régime thermique général au droit des stations suivies, l'évolution des températures moyennes journalières est présentée pour l'ensemble des stations disposant de suffisamment de données.

Ensuite, une série d'indicateurs (Tableau 2) a été calculée à l'aide de la Macro Excel MACMASalmo 1.0 (Dumoutier et *al.*, 2010). Pour que les indicateurs thermiques soient représentatifs et comparables entre les stations suivies, ceux-ci ne sont calculés que dans le cas où les stations disposent de chroniques complètes.

Tableau 2 : Synthèse des indicateurs thermiques calculés et de leur désignation

Indicateur	Description
Ti min	Température instantanée minimale
Ti max	Température instantanée maximale
Aj_Ti max	Valeur de l'amplitude thermique journalière maximale
D_Aj_Timax	Date à laquelle l'amplitude thermique journalière maximale a été enregistrée
Tmin	Température moyenne journalière minimale
Tmax	Température moyenne journalière maximale
D_Tmax	Date à laquelle la température moyenne journalière maximale a été enregistrée
T30j	Température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (sur la base des moyennes journalières)
Dd_T30j	Date de début de la période correspondant aux 30 jours consécutifs les plus chauds
Df_T30j	Date de fin de la période correspondant aux 30 jours consécutifs les plus chauds

3. RESULTATS

3.1 Validation des données

Sur les 18 stations suivies, l'essentiel des stations présente des enregistrements complets et sans valeurs aberrantes de janvier à décembre 2019. Le détail de la donnée disponible est synthétisé en Annexe 1.

Nous noterons toutefois les éléments suivants :

- Les données de la station de Saint Béat ne sont pas disponibles. En effet, les thermographes ont été perdus à cause de travaux réalisés sur la Garonne à ce niveau.
- Les thermographes localisés à la station de piégeage de Carbonne se sont retrouvés régulièrement hors d'eau entre mi-juillet et mi-octobre du fait de travaux.

Ainsi, le calcul des indicateurs thermiques concerne toutes les stations suivies à l'exception des deux citées ci-dessus.

3.2 Températures moyennes journalières

Les Figures 2 à 5 ci-dessous présentent l'évolution des températures moyennes journalières enregistrées pour l'année 2019 par station.

Pour des raisons de lisibilité, les données incomplètes enregistrées sur la Garonne à Saint Béat et à Carbonne sont présentées en Annexe 2.

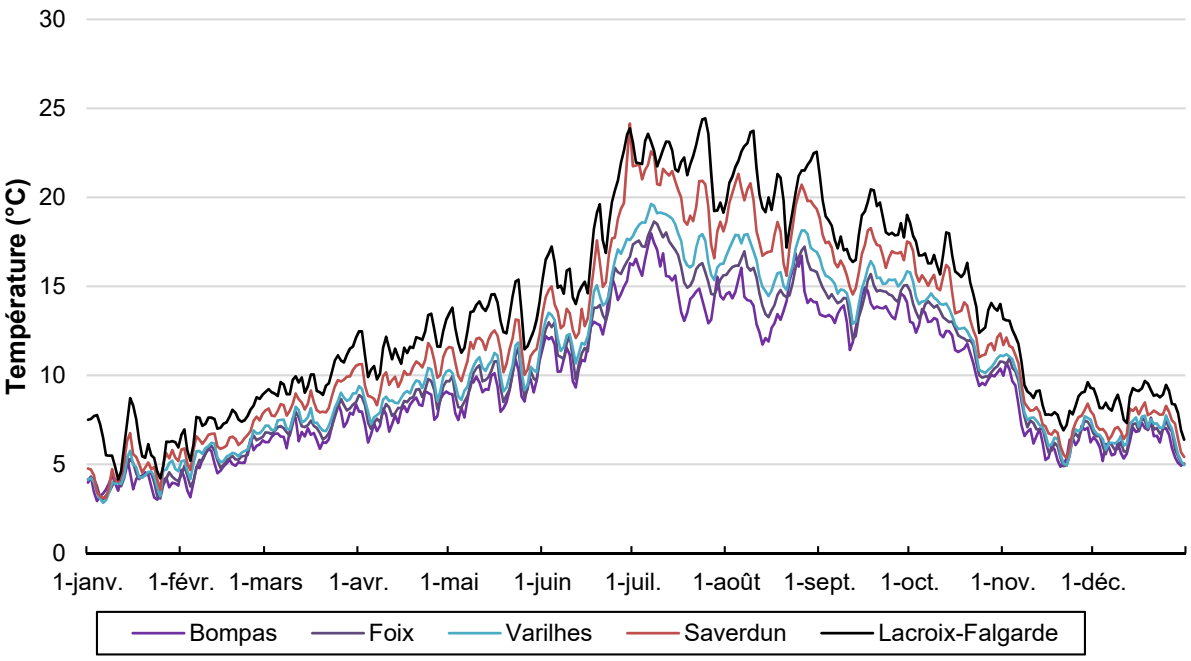


Figure 2 : Evolution des températures moyennes journalières sur l'Ariège en 2019

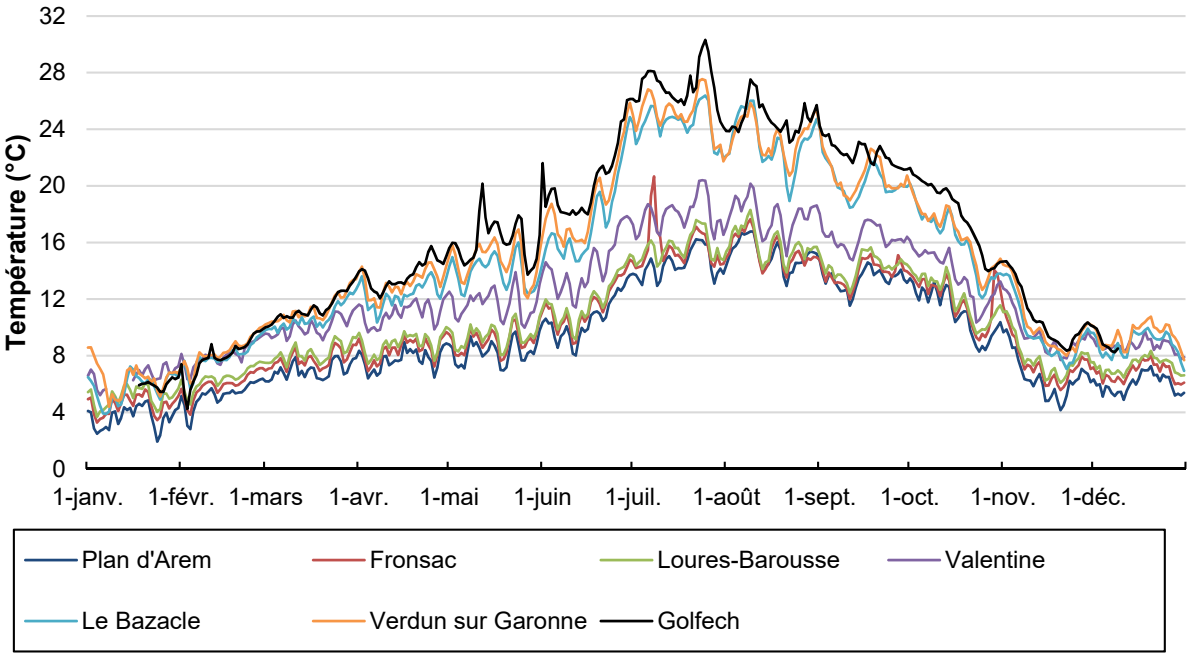


Figure 3 : Evolution des températures moyennes journalières sur la Garonne en 2019

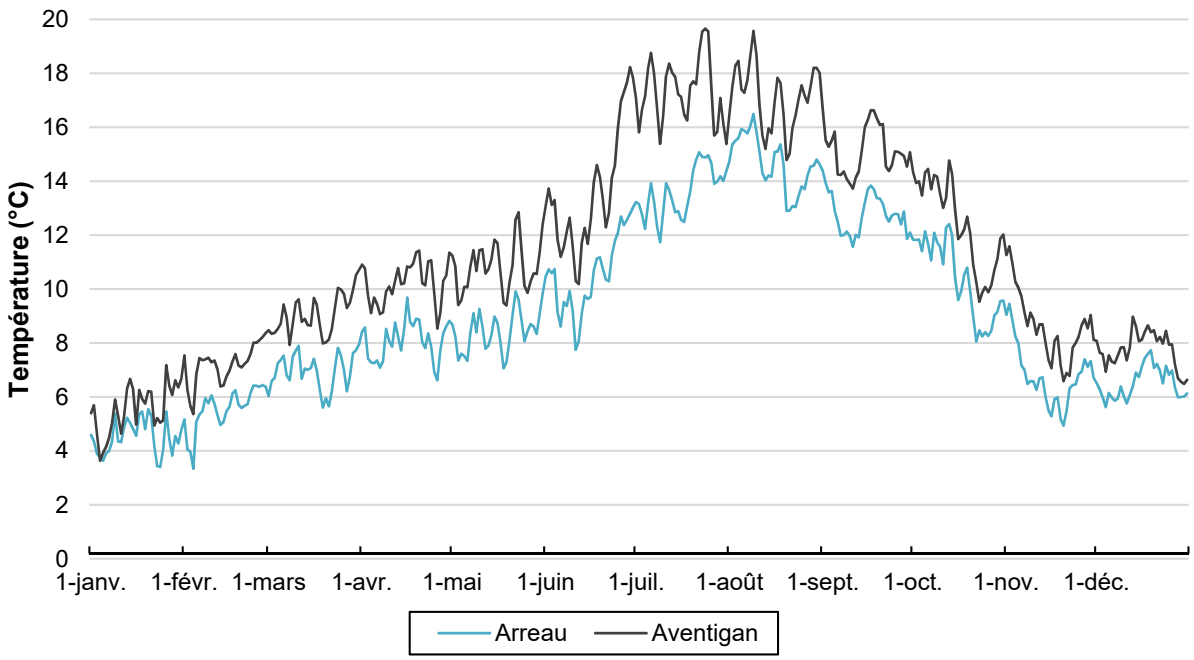


Figure 4 : Evolution des températures moyennes journalières sur la Neste en 2019

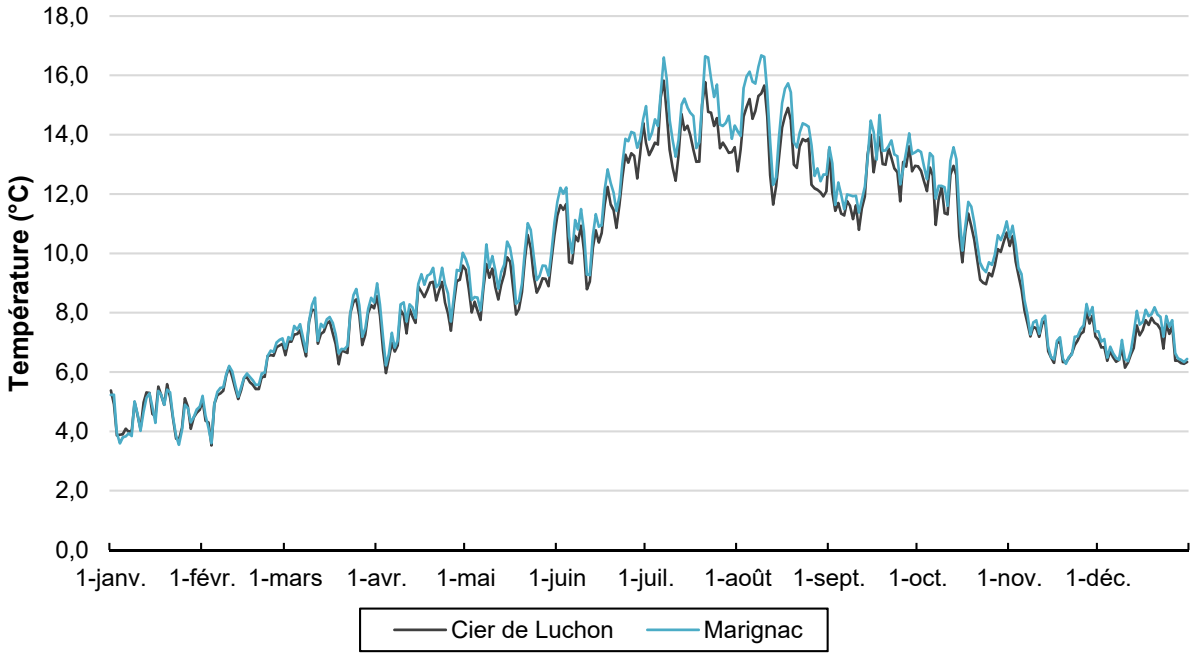


Figure 5 : Evolution des températures moyennes journalières sur la Pique en 2019

3.3 Indicateurs thermiques

Le détail des indicateurs calculés est présenté en Annexe 3. La Figure 6 présente par station suivie ; les **températures instantanées** minimales et maximales, ainsi que l'amplitude journalière maximale enregistrées sur la période étudiée.

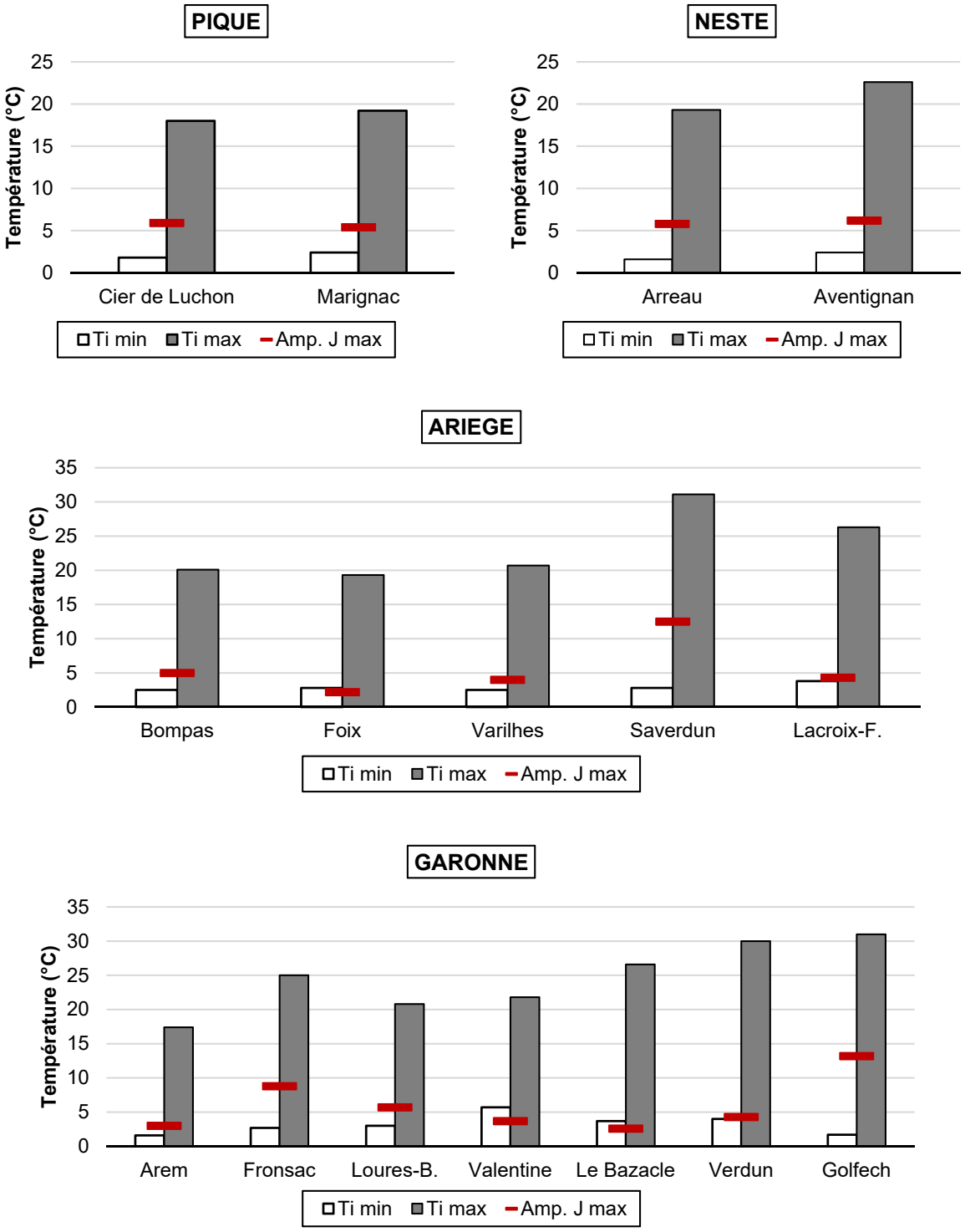


Figure 6 : Températures instantanées minimales, maximales et amplitudes journalières maximales enregistrées sur les stations suivies en 2019

Les données présentées dans la **Figure 7** sont à l'échelle des **températures moyennes journalières** (minimales et maximales sur l'année 2019). La température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds est également affichée par station.

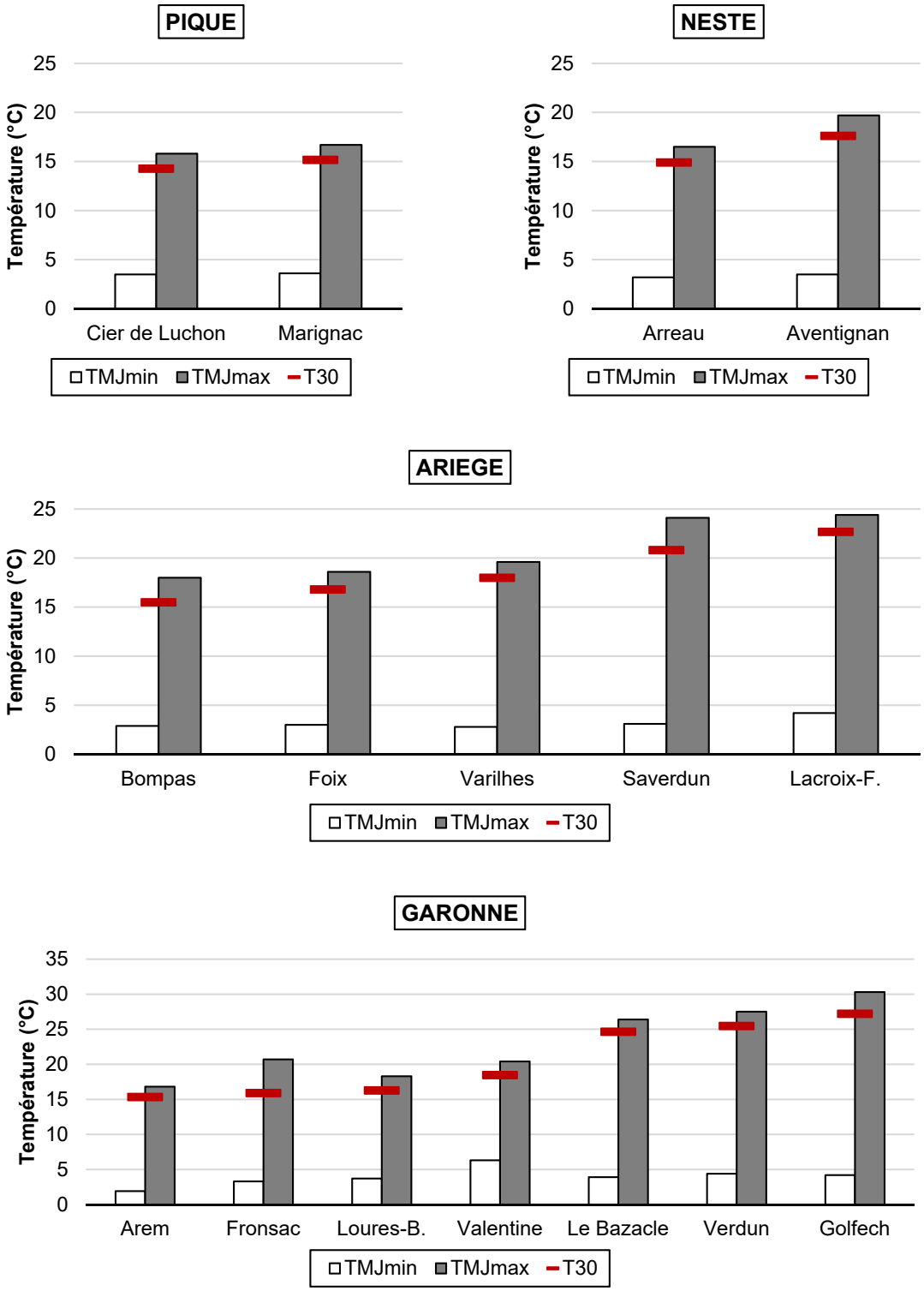


Figure 7 : Températures journalières moyennes minimales, maximales et moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds sur les stations suivies en 2019

4. BILAN ET PERSPECTIVES

A l'occasion du suivi thermique 2019 du bassin de la Garonne, 18 stations ont été suivies sur la Pique, la Neste, l'Ariège et la Garonne (jusqu'à Golfech). Afin de minimiser la perte de données, le nombre de thermographes par station avait été porté à 2 en 2019. Il a donc été possible de disposer de davantage de chroniques valides et complètes.

Enfin, compte tenu du volume de données enregistré, seuls des indicateurs ont été présentés dans ce rapport. Les données brutes sont toutefois consultables sur demande auprès de l'association.

5. BIBLIOGRAPHIE

DUMOUTIER Q., VIGIER L., CAUDRON A., 2010. Macro Excel d'Aide au Calcul de variables thermiques appliquées aux Milieux Aquatiques Salmonicoles, MACMASalmo1.0. *Rapport SHL293.2010 / FDP74.10/03*

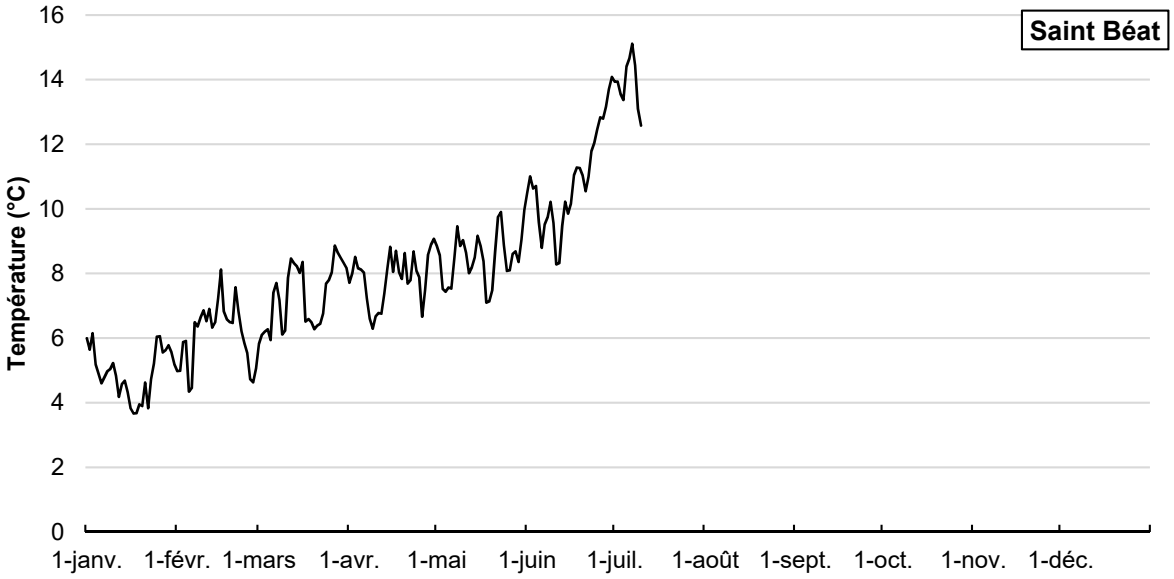
ANNEXES

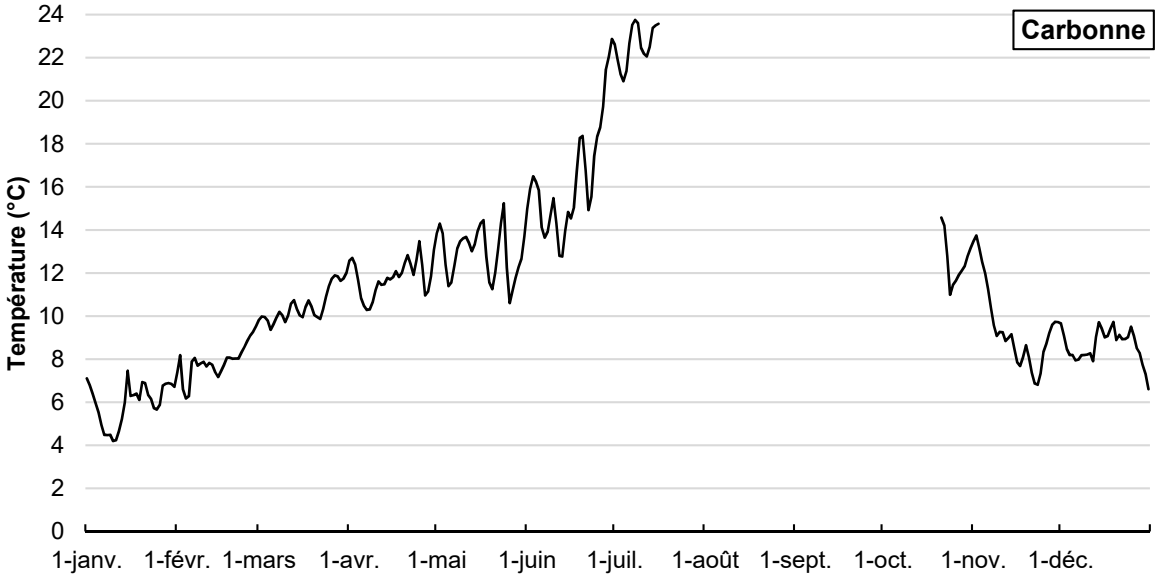
Annexe 1 : Synthèse de la donnée disponible sur les stations suivies en 2019

Les valeurs affichées par mois et par station correspondent au pourcentage de données horaires enregistrées par rapport au nombre d'enregistrements attendu.

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ariège	Bompas	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Foix	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Varilhes	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Saverdun	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Lacroix-Falgarde	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Garonne	Plan d'Arem	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Saint Béat	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Fronsac	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Loures-Barousse	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Valentine	0.7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Carbonne	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,0	0,0	0,4	1,0	1,0
	Le Bazacle	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Verdun-sur-Garonne	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Golfech	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1.0	0,3
Neste	Arreau	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Aventignan	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Pique	Cier de Luchon	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Marignac	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Annexe 2 : Evolutions des températures moyennes journalières sur la Garonne en 2019 - Chroniques incomplètes





Annexe 3 : Synthèse des indicateurs calculés sur les stations présentant des chroniques complètes pour 2019

Rappel des indicateurs et de leur désignation :

- ***Ti min :*** *Température instantanée minimale*
- ***Ti max :*** *Température instantanée maximale*
- ***Aj_Ti max :*** *Valeur de l'amplitude thermique journalière maximale*
- ***D_Aj_Timax :*** *Date à laquelle l'amplitude thermique journalière maximale a été enregistrée*
- ***Tmin :*** *Température moyenne journalière minimale*
- ***Tmax :*** *Température moyenne journalière maximale*
- ***D_Tmax :*** *Date à laquelle la température moyenne journalière maximale a été enregistrée*
- ***T30 :*** *Température moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds (sur la base des moyennes journalières)*
- ***Dd_T30 :*** *Date de début de la période correspondantes aux 30 jours consécutifs les plus chauds*
- ***Df_T30 :*** *Date de fin de la période correspondante aux 30 jours consécutifs les plus chauds*

Cours d'eau	Station	Ti min	Ti max	Aj_Tima x	D Ajmax	Tmin	Tmax	D Tmj max	T30	Dd Tm30j max	Df Tm30j max
Pique	Cier de Luchon	1,8	18	5,9	25/07/19	3,5	15,8	07/07/2019	14,3	13/07/19	11/08/19
	Marignac	2,4	19,2	5,4	25/07/19	3,6	16,7	09/08/2019	15,2	13/07/19	11/08/19
Neste	Arreau	1,6	19,3	5,8	13/04/19	3,2	16,5	09/08/2019	14,9	21/07/19	19/08/19
	Aventignan	2,4	22,6	6,2	22/07/19	3,5	19,7	24/07/2019	17,6	12/07/19	10/08/19
Ariège	Bompas	2,5	20,1	5	29/06/19	2,9	18	07/07/2019	15,5	24/06/19	23/07/19
	Foix	2,8	19,3	2,2	30/06019	3	18,6	08/07/2019	16,8	25/06/19	24/07/19
	Varilhes	2,5	20,7	4	18/06/19	2,8	19,6	07/07/2019	18	26/06/19	25/07/19
	Saverdun	2,8	31,1	12,5	29/06/19	3,1	24,1	30/06/2019	20,8	27/06/19	26/07/19
	Lacroix-F.	3,8	26,3	4,3	10/07/19	4,2	24,4	25/07/2019	22,7	27/06/19	26/07/19
Garonne	Arem	1,6	17,4	3	30/05/19	1,9	16,8	09/08/2019	15,4	21/07/19	19/08/19
	Fronsac	2,7	25	8,8	07/07/19	3,3	20,7	08/07/2019	15,9	07/07/19	05/08/19
	Loures-B.	3	20,8	5,7	24/07/19	3,7	18,3	09/08/2019	16,3	13/07/19	11/08/19
	Valentine(*)	5,7	21,8	3,7	22/05/19	6,3	20,4	24/07/19	18,5	13/07/19	11/08/19
	Le Bazacle	3,7	26,6	2,6	25/05/19	3,9	26,4	25/07/19	24,7	28/06/19	27/07/1
	Verdun	4	30	4,3	23/07/19	4,4	27,5	24/07/2019	25,48	28/06/19	27/07/19
	Golfech	1,7	3,1	13,2	11/02/19	4,2	30,3	25/07/19	27,22	29/06/19	28/07/19

(*) Données de janvier incomplètes. Les indicateurs sont calculés sur les données enregistrées de février à fin octobre 2019.

Les données figurant dans ce document ne pourront être exploitées de quelque manière que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable de MI.GA.DO. et de ses partenaires financiers.

Opération financée par :

PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL

Autres partenaires :

Association MIGADO

18 Ter Rue de la Garonne - 47520 LE PASSAGE D'AGEN - Tel : 05 53 87 72 42

www.migado.fr -