



HAL
open science

Suivi de l'efficacité de restauration de la continuité écologique. Cas des rivières du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse

Céline Le Pichon, Evelyne Tales, Amandine Zahm, Marie-Bernadette Albert, Mathieu Girondin, Aurélia Mathieu, Mathieu Roy, Deborah Slawson, Marion Jugie

► To cite this version:

Céline Le Pichon, Evelyne Tales, Amandine Zahm, Marie-Bernadette Albert, Mathieu Girondin, et al.. Suivi de l'efficacité de restauration de la continuité écologique. Cas des rivières du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse. *irstea*. 2019. hal-04192804

HAL Id: hal-04192804

<https://hal.inrae.fr/hal-04192804v1>

Submitted on 31 Aug 2023

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

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



**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

Programme 2016/2018 – Thème Préservation, restauration et réhabilitation des milieux aquatiques - Action n° 89

Suivi de l'efficacité de restauration de la continuité écologique

Cas des rivières du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse

Rapport final avant travaux

Céline Le Pichon, Aurélia Mathieu, Evelyne Tales, Amandine Zahm, Marion Jugie, Deborah Slawson, Marie-Bernadette Albert, Mathieu Roy, Nicolas Hette et Mathieu Girondin.

Février 2019



- Auteurs

Céline Le PICHON, Ingénieur de recherche (IRSTEA), celine.lepichon@irstea.fr

Evelyne TALÈS, Ingénieur de recherche (IRSTEA), evelyne.talès@irstea.fr

Amandine ZAHM, Assistante Ingénieur (IRSTEA), amandine.zahm@irstea.fr

Nicolas, Hette, Ingénieur de recherche contractuel (IRSTEA), nicolas.hette@irstea.fr

Marie-Bernadette ALBERT, Ingénieur de recherche (IRSTEA), marie-bernadette.albert@irstea.fr

Mathieu GIRONDIN, Assistant Ingénieur (IRSTEA), mathieu.girondin@irstea.fr

Aurélia MATHIEU, Ingénieur d'études contractuel 2011-2012 (IRSTEA)

Mathieu ROY, Ingénieur de recherche contractuel 2014 (IRSTEA)

Deborah SLAWSON, Ingénieur de recherche contractuelle 2012-2015 (IRSTEA), deborah.slawson@irstea.fr

Marion JUGIE, Stagiaire 2012 (IRSTEA)

- Correspondants

AFB : Nicolas POULET, Chargé d'études (ONEMA), nicolas.poulet@onema.fr

Partenaire :

François HARDY, responsable cellule environnement (PNR HVC), f.hardy@parc-naturel-chevreuse.fr

Nicolas FLIPO, responsable du programme Piren-Seine, Nicolas.Flipo@mines-paristech.fr

- Autres contributeurs

Adrien REY / Maxime ROCHER, Techniciens rivière (PNR HVC), sos-rivieres@pnr-chevreuse.org

Virginie PASTOR, chargé d'études environnement, v.pastor@parc-naturel-chevreuse.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : régional

Couverture géographique : département;

Bassin Seine Normandie : bassin versant Orge-Yvette, rivière Aulne et Mérantaise

Niveau de lecture : professionnels, experts



Suivi de l'efficacité de
restauration de la continuité
écologique

Rapport final avant travaux
Le Pichon et coll.

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

- Résumé

- mots clés : Vallée de Chevreuse, restauration, continuité écologique



Suivi de l'efficacité de
restauration de la continuité
écologique
Rapport final avant travaux
Le Pichon et coll.

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

- TITLE
- Abstract

- Key words (thematic and geographical area)



Suivi de l'efficacité de
restauration de la continuité
écologique
Rapport final avant travaux
Le Pichon et coll

**AGENCE FRANÇAISE
POUR LA BIODIVERSITÉ**

Établissement public du ministère de l'Environnement

- [Cette synthèse pourra être utilisée indépendamment du rapport final, elle doit donc être utilisable telle quelle]
- [Cette synthèse est référencée en tant que telle sur le site de l'AFB et sur le portail documentaire national « Les documents techniques sur l'eau ».]
- [Cette synthèse de vulgarisation montre les résultats et leurs utilités (potentialités) pour la gestion ou la décision ; des figures, tableaux peuvent y être insérés. Les objectifs rappelés dans les fiches action de la convention peuvent servir de base pour cette rédaction.]
- Synthèse pour l'action opérationnelle [4 pages maximum]

[Il est très important que le rapport final des résultats des recherches soit accompagné d'une synthèse présentant **les principaux résultats transférables**.

Cette synthèse proposée par les scientifiques producteurs de ces connaissances (résultats, méthodes, recommandations...) doit faire l'objet d'un travail spécifique entre les auteurs du rapport et les chargés de mission de l'AFB.]

[La synthèse comporte par exemple :

- ° Contexte général (quelle situation, quels enjeux au niveau réglementaire, au niveau de la gestion des milieux aquatiques, ou au niveau scientifique), objectifs généraux du projet (à quelles questions veut-on répondre ? quand, avec quelles échéances et avec qui le projet est-il mené ?)
- ° Brève information sur les méthodes utilisées et sur les données d'entrée (indications brèves sur leurs nature, source, quantité, extensions spatiales et temporelles)
- ° Principaux acquis transférables obtenus (le cas échéant sous forme de tableau de synthèse) et implications pratiques et/ou recommandations et/ou réalisations pratiques. Limites de l'utilisation, et perspectives d'améliorations opérationnelles
- ° Pour en savoir plus : quelques références (dont les livrables, articles prévus...) ; adresse électronique et/ou site internet de(s) auteur(s)]

Sommaire

1. INTRODUCTION	12
1.1. CONTEXTE	12
1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE AVANT RESTAURATION	12
2. CHOIX DES SEUILS A RESTAURER	13
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DES DEUX COURS D'EAU CHOISIS	13
2.2. L'AULNE ET LE MOULIN DE BECHEREAU	14
2.2.1. <i>Substratum géologique</i>	14
2.2.2. <i>Histoire du moulin</i>	14
2.3. LA MERANTAISE ET LE MOULIN D'ORS	16
2.3.1. <i>Substratum géologique</i>	16
2.3.2. <i>Evolution historique du tracé de la Mérantaise</i>	16
2.3.3. <i>Le moulin d'Ors et le seuil d'Ors</i>	17
3. CARACTERISTIQUES HYDROMORPHOLOGIQUES AMONT-AVAL DES SEUILS D'ORS ET DE BECHEREAU	20
3.1. ECHELLE STATIONNELLE	20
3.1.1. <i>Relevés de terrain (topographie, granulométrie)</i>	20
3.1.2. <i>Détermination des caractéristiques à plein bord</i>	22
3.1.3. Granulométrie	23
3.1.4. <i>Evolution temporelle de la morphologie de l'Aulne après la crue de juin 2016</i>	32
3.2. ECHELLE LONGITUDINALE	40
3.2.1. <i>Profil en long de l'Aulne</i>	40
3.2.2. <i>Profil en long de la Mérantaise</i>	42
4. DONNEES DEBIMETRIQUES	43
4.1. MESURES EN CONTINU DES HAUTEURS D'EAU	43
4.2. JAUGEAGES ET COURBES DE TARAGE	43
4.3. SUIVI DES DEBITS	46
4.4. COURBE DES DEBITS CLASSES	52
5. IDENTIFICATION DES FACIES D'ECOULEMENT, DES ABRIS ET DE LA RIPISYLVE	52
5.1. FACIES INVENTORIES SUR L'AULNE	53
5.2. FACIES INVENTORIES SUR LA MERANTAISE	55
5.3. FACIES INVENTORIES SUR LES SECTEURS D'ETUDES « TELEMETRIE »	57
5.4. LES ABRIS	58
6. SUIVI AVANT RESTAURATION DES COMMUNAUTES DE MACROINVERTEBRES	60
6.1. ETAT DES LIEUX DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'AULNE (RAPPORT HYDROSPHERE DONNEES 2012) 60	
6.2. CALCUL DES INDICES IBG-DCE	60
6.3. EVOLUTION TEMPORELLE DES COMMUNAUTES DE MACROINVERTEBRES SUR L'AULNE	64
6.4. CALCUL DES INDICES I2M2	65
7. INVENTAIRES DES FRAYERES A TRUITE ET DU PEUPEMENT DE POISSONS	66
7.1. INVENTAIRE DES FRAYERES A TRUITE DE 2008 A 2014	66
7.2. ECHANTILLONNAGE DES POISSONS PAR PECHE ELECTRIQUE	69
7.3. INVENTAIRE DES JUVENILES DE TRUITES (0+ ET 1+) PAR PECHE ELECTRIQUE	74
7.4. ECHANTILLONNAGE DU PEUPEMENT DE POISSONS PAR PECHE ELECTRIQUE COMPLETE	78

7.5.	POTENTIALITES DE DETECTION DES PEUPELEMENTS DE POISSONS A L'AIDE DE L'ADN ENVIRONNEMENTAL	79
7.5.1.	<i>Protocole</i>	79
7.5.2.	<i>Résultats</i>	82
8.	ETUDE DES DEPLACEMENTS DE TRUITE AVANT RESTAURATION	86
8.1.	MARQUAGE DES TRUITES ET PROTOCOLES DE SUIVI	86
8.1.1.	<i>Choix des émetteurs utilisés</i>	86
8.1.2.	<i>Marquage des truites</i>	86
8.1.3.	<i>Protocole de suivi des déplacements</i>	87
8.1.4.	<i>Analyse des données de mouvements : caractérisation des trajectoires</i>	89
8.2.	RESULTATS DU SUIVI DES DEPLACEMENTS DE TRUITE	90
8.2.1.	<i>Caractéristiques générales des individus échantillonnés pour cette étude</i>	90
	• <i>Poids et taille des individus étudiés</i>	90
	• <i>Age des truites échantillonnées</i>	91
	• <i>Analyse génétique</i>	92
8.2.2.	<i>Mouvements effectués par les truites sur l'Aulne et la Mérantaise</i>	94
8.2.3.	<i>Types de comportements observés</i>	94
8.2.4.	<i>Etude des comportements suite au marquage</i>	97
8.2.5.	<i>Comportements par rapport aux obstacles présents sur le secteur</i>	99
8.2.6.	<i>Heures d'activité au boîtier fixe des Ponts de Pierre (Mérantaise)</i>	101
8.2.7.	<i>Mouvements effectués lors de la période de reproduction</i>	103
8.2.8.	<i>Relations entre mouvements et variables environnementales</i>	103
9.	EVALUATION DE LA DIVERSITE TROPHIQUE SUR L'AULNE A BECHEREAU	105
10.	MODELISATION DES PROBABILITES DE RECOLONISATION DES FRAYERES A TRUITE POTENTIELLES SUITE A LA RESTAURATION DE LA CONTINUTE ECOLOGIQUE DE LA MERANTAISE	114
10.1.	PRINCIPE DE MODELISATION A L'AIDE DU LOGICIEL ANAQUALAND 2.0.....	114
10.2.	DONNEES CARTOGRAPHIQUES UTILISEES.....	114
10.2.1.	<i>Carte des frayères et des habitats journaliers potentiels</i>	114
10.2.2.	<i>Carte de résistance au déplacement vers l'amont</i>	117
10.3.	PARAMETRES DE MODELISATION.....	117
10.3.1.	<i>Valeurs de résistance au déplacement selon la taille</i>	117
10.3.2.	<i>Mobilité des poissons</i>	118
10.4.	MODELISATION DE LA CONNECTIVITE	119
10.5.	RESULTATS ET DISCUSSION.....	119
11.	MODELISATION DE LA VIABILITE DES POPULATIONS DE TRUITES SUR LA MERANTAISE	124
11.1.	SCENARIOS TESTES.....	125
11.2.	RESULTATS.....	125
11.3.	DISCUSSION.....	128
12.	CONCLUSION	129
12.1.	BILAN SUR LA MERANTAISE	129
12.2.	BILAN SUR L'AULNE	130

Figure 1– Localisation des cours d'eau dans le bassin Orge-Yvette	14
Figure 2 – Documents historiques sur le moulin de Béchereau : à gauche plan de 1825, à droite photo 1925 (l'angle de vue de la photo est indiqué sur le plan). Daniel Picard, www.hist-bullion.fr	15
Figure 3 – Documents historiques sur le moulin de Béchereau : à gauche photo 1920, à droite photo 2010 (le bâtiment du moulin a entièrement disparu). Daniel Picard, www.hist-bullion.fr	15
Figure 4 – Chute sur le bief du moulin de Béchereau	16
Figure 5 – Illustration de la présence des moulins de la Mérantaise sur la carte de Cassini (1756).17	
Figure 6 – Illustration des bras de dérivations de la Mérantaise pour l'usage des moulins (source: ADY).....	17
Figure 7 – Evolution historique des tracés de la Mérantaise avant et après l'activité des moulins (XIX et XXème siècle). Carte postale du Moulin d'Ors au début du XXème siècle (source: base Mérimée).	18
Figure 8 – Extrait du rapport d'ingénieur de 1921 - illustration des lieux pour la désaffectation du moulin d'Ors. (source: ADY - 7S 112-114).	18
Figure 9 – Seuil d'Ors actuellement.	19
Figure 10 – Emprise spatiale des mesures stationnelles et longitudinales sur la Mérantaise.	20
Figure 11 – Les divers points de mesures du levé topographique réalisé à l'aide du tachéomètre..	21
Figure 12 – Calculs de ligne d'eau (LE) avec Fluvia sur l'Aulne à Béchereau amont	22
Figure 13 – La station Aulne en amont : granulométrie ; la courbe rouge représente le pourcentage cumulé et les barres vertes, la distribution du nombre de particules.	24
Figure 14 – La station Aulne en amont : chenal incisé en train de s'élargir.	24
Figure 15 – La station Aulne en aval : granulométrie pondérée par faciès et granulométrie d'un radier.	25
Figure 16 – La station Aulne en aval : chenal incisé avec de légers méandres.	26
Figure 17 – La station Mérantaise en amont: granulométrie pondérée par faciès et granulométrie d'un radier.	27
Figure 18 – La station Mérantaise en amont : chenal incisé et quasi-équilibré.....	28
Figure 19 – La station Mérantaise en aval: granulométrie pondérée par faciès et granulométrie d'un radier.	29
Figure 20 – La station Mérantaise en aval : chenal incisé de la première partie.....	30
Figure 21 – Profil en long de l'Aulne, présentant les 2 seuils majeurs.	40
Figure 22 – Profil en long de l'Aulne, centré sur le seuil du Moulin de Béchereau.....	41
Figure 23 – Profil en long de l'Aulne, centré sur le seuil de La Galetterie.....	41
Figure 24 – Profil en long de la Mérantaise, présentant 4 zones de surcreusement.....	42
Figure 25 – Profil en long de la Mérantaise, centré sur le seuil d'Ors.....	43
Figure 26– Calcul de la courbe de tarage.	44
Figure 27– Calcul de la courbe de tarage.	45
Figure 28 – Variation des hauteurs d'eau et des débits sur l'Aulne (pont de Béchereau) et la Mérantaise (passerelle du pré Bicheret).	47
Figure 29 – Crue sur l'Aulne, le 21 décembre 2012. Vue de la chute du seuil de la Galetterie, dépôts de sable sur la berge juste en aval du seuil.	48
Figure 30 – Débits sur l'Aulne et la Mérantaise jusqu'en 2013.	49
Figure 31 – Débits calculés à partir des hauteurs d'eau sur l'Aulne de 2012 à 2019.....	50
Figure 32 – Débits calculés sur l'Aulne, les débits à plein bord sont figurés en pointillés rouge ($1\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ à la station amont et $2,5\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à la station aval).	51
Figure 33 – Courbes des débits classés de l'Aulne au moulin de Béchereau et de la Mérantaise au Moulin d'Ors.	52
Figure 34 – Inventaire des faciès sur l'Aulne.....	54

Figure 35 – Distribution tous les 100 mètres des différents faciès à l'amont et à l'aval du moulin de Béchereau. Code des faciès sur la Figure 34.	55
Figure 36 – Inventaire des faciès sur la Mérantaise	56
Figure 37 – Distribution tous les 100 mètres des différents faciès à l'amont et à l'aval du moulin d'Ors. Code des faciès sur la Figure 34.	57
Figure 38 – Carte d'hétérogénéité de l'habitat (logiciel Chloé 2012) sur la Mérantaise et localisation de la truite 23 du 3 avril au 31 août. (Pour des questions de visualisation, le cours d'eau a été grossi 8 fois).....	58
Figure 39 – Carte des faciès et des abris sur le secteur d'étude « télémétrie » de l'Aulne (Vaultier 2012).	59
Figure 40 – Inventaire des frayères à truite de 2009 à 2014 sur l'Aulne (pas d'inventaire en 2013).67	
Figure 41 – Inventaire des frayères à truite de 2008 à 2014 sur la Mérantaise.	68
Figure 42 – localisation des stations amont et aval du moulin de Béchereau (en jaune) et position des échantillonnages par pêche électrique selon la méthode des EPA (points oranges),.....	70
Figure 43 – Pêche électrique au pied du seuil du moulin de Béchereau 2013; truite fario capturée.70	
Figure 44 – Distribution spatiale des truites capturées par pêche électrique en 2011,2013 et 2015 sur la Mérantaise; 600m en amont et en aval du seuil du moulin d'Ors.....	72
Figure 45 – Distribution spatiale des truites capturées par pêche électrique en 2011, 2013 et 2015 sur l'Aulne ; 600m en amont et en aval du seuil du moulin de Béchereau,.....	73
Figure 46 – Taille (mm) des truites capturées par pêche électrique en 2011, 2013 et 2015. Ages indicatifs, donnés à partir de la relation taille/âge issus de la lecture des écailles des individus échantillonnés en 2012. B : Béchereau ; O : Ors	74
Figure 47 – Truitelle de 100 mm	75
Figure 48 – Distribution spatiale des juvéniles de truites capturées par pêche électrique en 2013 sur la Mérantaise ; échantillonnage des radiers ou plats courants. Les bulles numérotées correspondent aux localisations des pêches sur radiers, effectuées par le PNR HVC en 2011.	76
Figure 49 – Distribution spatiale des juvéniles de truites capturées par pêche électrique en octobre 2013 sur l'Aulne ; échantillonnage des radiers ou plats courants.	77
Figure 50 –Distribution des tailles de juvéniles de truites sur l'Aulne et la Mérantaise en 2013. Ages donnés à titre indicatif.	78
Figure 51 –Localisation des stations de prélèvement de l'ADN (à gauche, sigle jaune) et détail des connexions de l'Aulne avec des arrivées d'eau d'étangs, de bassins ou de zones humides à proximité de la station Béchereau amont (à droite, flèches).	80
Figure 52. Prélèvement d'ADNe sur l'Aulne (source : Irstea)	81
Figure 53. Occurrences de réplicas positifs dans les trois échantillons (filtrations) réalisés à chaque station et aux deux dates de prélèvements.	82
Figure 54. Pourcentage de séquences d'ADNe moyen par station et date : en haut, septembre 2016 et en bas janvier 2017.....	84
Figure 55. Abondance relative (pourcentage) des effectifs estimés par pêche électrique à deux passages (13 octobre 2016, Tableau).....	85
Figure 56 – Illustration du protocole de chirurgie : insertion des émetteurs dans la cavité péritonéale à gauche et émetteurs à antenne encapsulée de 2,5 et 4 gr à droite.	87
Figure 57 – Coffret fixe de détection et d'enregistrement comprenant le boîtier récepteur ATS et une batterie d'alimentation. Une antenne filaire sort du coffret et son extrémité est plongée dans le cours d'eau.....	88
Figure 58 – Matériel utilisé pour le suivi manuel : boîtier de détection portatif et antenne boucle. ...	88
Figure 59 – Position des boîtiers fixes et linéaire prospecté manuellement.	89
Figure 60 – Localisation spatiale hebdomadaire et graphe de trajectoire correspondant.	90

Figure 61 – Relation entre taille et âge des individus	92
Figure 62 – Résultats de l'analyse d'assignation (MER : Mérantaise, AUL : Aulne)	93
Figure 63 – Types de comportements observés chez l'ensemble des truites suivis par télémétrie radio.	95
Figure 64 – Graphe de trajectoire de la truite 29, capturée sous la chute du seuil d'Ors.	95
Figure 65 – Forces de signal enregistrées par le boîtier fixe situé sous la chute du seuil d'Ors – truite 29. Zoom sur les forces de signal enregistrées par le boîtier fixe d'Ors entre le 10/04/2010 et le 27/04/2012 pour la truite 29 (les pointillés rouge marquent l'horaire 12h de chaque jour).	96
Figure 66 – Trajectoire et gîtes préférentiels de la truite 16.....	97
Figure 67 – Durée post marquage en fonction de la taille des individus sur la Mérantaise.	99
Figure 68 – Graphe de trajectoire de la truite 18. Lieu de capture en rouge, position des seuils en pointillés marron.	100
Figure 69 – Graphe de trajectoire des truites 14, 15, 16 et 18 et position de l'embâcle. Photo de la zone d'embâcle et mouille en aval.	101
Figure 70 – Temps potentiel d'enregistrement de passage de tous les poissons par le boîtier fixe des Ponts de Pierre en fonction de l'heure et de la période.	102
Figure 71 – Etendue des déplacements pendant et hors période de reproduction	103
Figure 72 – Distance parcourue par tous les poissons sur l'Aulne en fonction des niveaux d'eau et de la température aux mêmes dates.....	104
Figure 73 – Principe de l'utilisation des isotopes stables pour les études de diversité trophique. Les principaux transferts d'énergie s'effectuent suivant le sens des flèches. ΔC et ΔN représentent le fractionnement isotopique existant entre un consommateur et sa nourriture.	106
Figure 74 – Résultats de la diversité isotopiques des divers compartiments échantillonnés aux deux stations amont et aval du seuil de Béchereau.	108
Figure 75 – Exemple théorique illustrant le calcul des métriques isotopiques. Les points représentent des individus de trois espèces (en couleur) pour lesquelles des ellipses standards ont été calculées et un individu d'une espèce (croix). L'aire de l'espace isotopique (ISA) correspond à l'aire du polygone convexe qui contient les ellipses standards et les individus extrêmes (aire en gris). L'ellipse standard est une ellipse qui contient environ 40 % des signaux du jeu de données initial. CR et NR correspondent à la longueur des flèches sur chaque axe (d'après Hette-Tronquart et al. 2017). ..	110
Figure 76 – Exemple de relevé de frayère, réalisé par le PNR HVC en 2010 sur la Mérantaise....	115
Figure 77 – Distribution longitudinale des frayères potentielles (noir) et des habitats journaliers (rouge) le long de la Mérantaise.	115
Figure 78 – Probabilité de présence des truites dans leurs habitats journaliers (A) issue du modèle GLM. Taches d'habitats journaliers définies par les probabilités supérieures à 0,4 (B).	117
Figure 79 – Schématisation du calcul de résistance cumulée minimale et de probabilité d'atteindre la tache d'habitat H _j , exemple pour un barbeau de 15 cm.	119
Figure 80 – Evolution cumulée de l'indicateur de connectivité aux frayères avant et après restauration pour les poissons de la classe de taille >23cm.	120
Figure 81 – Aires de frayères potentielles connectées (m ²) en fonction des scénarios d'effacement de seuil.	121
Figure 82 – Valeurs d'accessibilité des frayères depuis l'aval dans le scénario actuel (en bas) et gain d'accessibilité obtenu avec l'effacement des 4 premiers obstacles (milieu), puis des 4 obstacles suivants (haut). Les astérisques indiquent la position des obstacles, en rouge : obstacle présent, en bleu : obstacle effacé.	122
Figure 83 – Valeurs d'accessibilité des frayères depuis un habitat journalier dans le scénario actuel (bas) et gain d'accessibilité obtenu avec l'effacement des quatre premiers obstacles (milieu), puis des	

quatre obstacles suivants et des quatre derniers (haut). Les astérisques indiquent la position des obstacles en rouge.	123
Figure 84 – Exemple d'évolution temporelle de la taille de la population en amont d'un obstacle (cas d'un effectif initial équivalent aux effectifs observés en aval) en fonction des valeurs de migration liées à la franchissabilité de cet obstacle.....	126
<i>Figure 85 – Taille de la métapopulation de truites fario sur la Mérantaise en fonction du degré d'aménagement des obstacles.....</i>	<i>126</i>
<i>Figure 86 – probabilité de survie des populations en fonction du temps.</i>	<i>128</i>

1. Introduction

1.1. Contexte

En cherchant à maîtriser les débits, les phénomènes d'érosion et de crue, à faciliter le transport par voie navigable ou simplement pour occuper l'espace, l'Homme a profondément modifié la morphologie des cours d'eau et par conséquent leur fonctionnalité.

Avec l'adoption de la Directive cadre sur l'eau (DCE) par le Parlement Européen et le Conseil le 23 octobre 2000, l'Europe s'est fixé des objectifs de préservation et de restauration de l'état écologique des masses d'eau. Or, il apparaît que pour 50% des masses d'eau de surface française, la canalisation des cours d'eau et les obstacles à l'écoulement constituent un « risque de Non Atteinte du Bon Etat ».

Afin de répondre aux problèmes de fragmentation des cours d'eau, la LEMA de 2006 (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques) impose un classement avant le 1^{er} janvier 2014 des ouvrages hydrauliques suivant leur impact sur la continuité. Le Grenelle de l'environnement de 2007 a permis la mise en place d'un outil d'aménagement du territoire, baptisé "Trame Verte et Bleue" (TVB). Ce dernier vise à reconstituer un réseau écologique cohérent, à l'échelle du territoire national, afin de permettre aux espèces animales et végétales d'assurer leur survie.

Actuellement de nombreux plans de restauration de la continuité écologique des cours d'eau se mettent en place. Les acteurs locaux commencent à engager des études pour gérer, aménager ou effacer ces obstacles. Pourtant, l'efficacité de ces actions reste peu documentée, faute de suivis avant/après restauration. Le rétablissement de la continuité écologique, défini en milieu aquatique par la circulation des espèces et le bon déroulement du transport des sédiments, nécessite la mise en place d'un suivi avant et après restauration afin d'évaluer l'impact des opérations sur l'écosystème.

C'est dans ce contexte que le Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse (PNRHVC) mène un vaste projet de restauration de la continuité écologique de ses rivières. En partenariat avec l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), un protocole de suivi de ces restaurations a été établi. Il comprend l'étude des compartiments hydromorphologique, hydraulique et biologique.

1.2. Objectif de l'étude avant restauration

Concernant les volets hydromorphologique et hydraulique, il s'agit d'étudier l'évolution des caractéristiques hydromorphologiques : restauration de la pente, diversification des faciès d'écoulement, rétablissement de la dynamique fluviale du cours d'eau par une reprise du transport solide, évolution des régimes hydrauliques, suite à la restauration de seuils. Enfin, le volet biologique comprend des pêches électriques pour inventorier les espèces piscicoles présentes, un suivi de truites par télémétrie et un suivi des macroinvertébrés. L'objectif de ce dernier est de caractériser les peuplements (abondance, diversité, polluosensibilité) de macroinvertébrés avant restauration. Le suivi de truite fournira des informations de localisations et de mouvements pendant et hors période de reproduction. A terme, il s'agit d'analyser les capacités des espèces piscicoles à recoloniser les

secteurs amont jusqu'alors inaccessibles. L'objectif de ce projet est donc, grâce à un suivi avant/après restauration, de qualifier la trajectoire que prendra l'écosystème suite aux travaux de restauration.

2. Choix des seuils à restaurer

Les cours d'eau situés dans le Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse sont tous situés en tête de bassin versant. La détermination des ouvrages à restaurer en priorité s'est faite en fonction d'une espèce patrimoniale caractéristique de ces cours d'eau en tête de bassin versant à savoir la Truite de rivière (*Salmo trutta fario*). La truite Fario constitue un bioindicateur de la qualité des cours d'eaux, compte tenu de ses exigences en matière de teneur en oxygène et de sa polluosensibilité vis-à-vis de nombreux facteurs physiques et chimiques (température, turbidité, polluants divers...). De plus, pendant la reproduction, ces poissons migrent vers l'amont pour frayer dans des zones qui répondent à des critères bien spécifiques : graviers grossiers non colmatés, courant vif, eau de bonne qualité et bien oxygénée... Dans un cas de suppression d'obstacle, cette espèce constitue donc un bon indicateur de restauration de la continuité écologique.

Les résultats des inventaires piscicoles (truites juvéniles et adultes), de frayères et d'obstacles sur le territoire du PNR HVC permettent d'identifier clairement deux cours d'eau prioritaires pour l'espèce cible choisie. Sur ces cours d'eau, appartenant au bassin versant Orge-Yvette (Figure 1), les limites amont de remontée des truites ont été identifiées.

Sur l'Aulne, affluent de la Rémarde, en amont du moulin de Béchereau, aucune truite et frayère n'ont été recensées alors qu'elles sont bien présentes à l'aval. Malgré le faible nombre de truites pêchées sur la partie aval du moulin de Béchereau (8 en 2010), ce secteur semble être un lieu de fraie important (31 frayères recensées en 2009), attestant ainsi de la présence de géniteurs.

Sur la Mérantaise, affluent de l'Yvette, entre le moulin des Vassaux et le moulin d'Ors, 13 truites ont été pêchées en 2010 et 9 frayères recensées en 2008 (9 en 2009). Malgré le grand linéaire prospecté à l'amont du moulin d'Ors, aucune truite et frayère n'ont été recensées. Cet obstacle marque donc la limite amont de remontée de la truite sur ce cours d'eau.

Sur l'Yvette, jusqu'aux obstacles de la Reinerie à Levis-saint-Nom (vannage), 46 truites ont été pêchées en 2010 et 24 frayères fonctionnelles inventoriées en 2009. La reproduction à l'amont de cet obstacle semble ne pas s'effectuer et aucune truite n'a été observée par pêche électrique. L'ouvrage en béton et la vanne en bois représentent donc un obstacle bloquant pour l'espèce ciblée dans cette étude.

La volonté de restauration s'est dans un premier temps portée sur le moulin de Béchereau (rivière Aulne) et le moulin d'Ors (sur la Mérantaise). L'étude qui suit présente le suivi de ces restaurations.

2.1. Situation géographique des deux cours d'eau choisis

Les deux cours d'eau étudiés sont situés en tête de bassin. Drainant un bassin versant d'une superficie de l'ordre de 60 km², l'Aulne est un cours d'eau de rang 3, selon la classification de Strahler, qui prend sa source à Auffargis sur le plateau de Saint Benoît. Il alimente ensuite la Rémarde qui rejoint l'Orge, affluent de la Seine. Le bassin versant de la Mérantaise s'étend sur 31 km². Ce cours d'eau de rang 1 selon Strahler, rejoint l'Yvette, puis l'Orge.

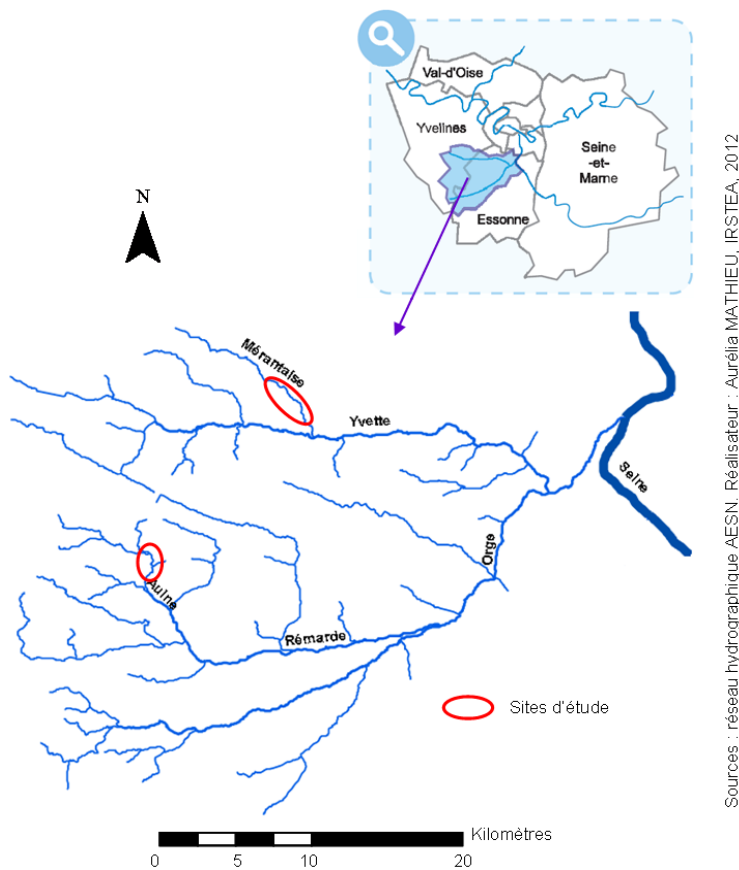


Figure 1– Localisation des cours d'eau dans le bassin Orge-Yvette

2.2. L'Aulne et le moulin de Béchereau

2.2.1. Substratum géologique

La partie amont de l'Aulne est au contact des sables et grès de Fontainebleau. Cette formation sableuse imperméabilisée à sa base par des marnes et argiles vertes, constitue un des aquifères principaux de la région. La relation nappe/rivière y est forte, avec un soutien d'étiage en été et la réalimentation de la nappe en hiver. Au niveau de la confluence avec la Rémarde, la craie blanche à silex apparaît sous le lit de l'Aulne. Les sables et grès de Breuillet réalisent la transition entre les sables de fontainebleau et la craie.

2.2.2. Histoire du moulin

Au total 8 ouvrages ont été recensés sur l'Aulne, 7 sont qualifiés d'infranchissables par la faune piscicole. C'est le cas du moulin de Béchereau. Des photos historiques permettent de mieux comprendre le dispositif actuel.

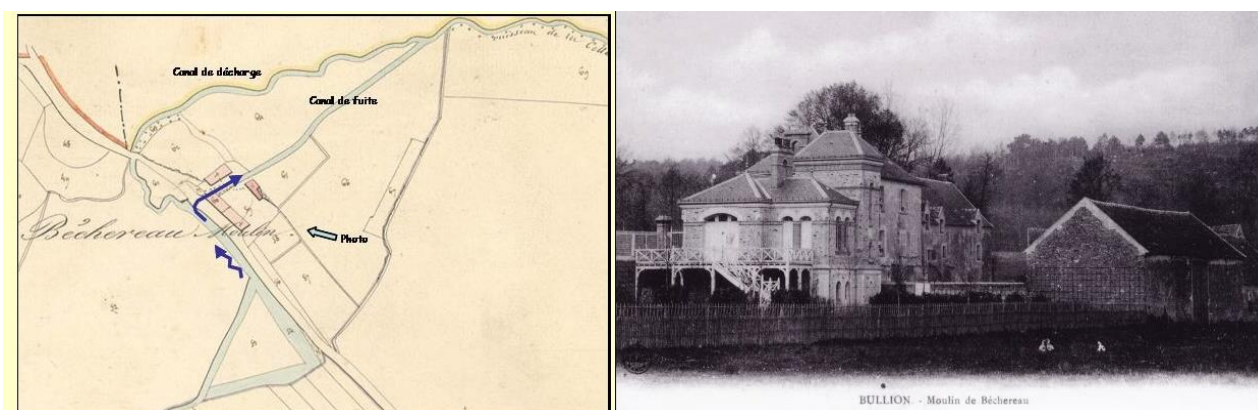


Figure 2 – Documents historiques sur le moulin de Béchereau : à gauche plan de 1825, à droite photo 1925 (l'angle de vue de la photo est indiqué sur le plan). Daniel Picard, www.hist-bullion.fr

Le plan de gauche expose le réseau hydraulique du moulin de Béchereau en 1825 (Figure 2). Le bief d'amenée se terminait sous forme de triangle et le canal de fuite permettait l'évacuation de l'eau en aval de la roue hydraulique. Aujourd'hui l'Aulne emprunte le canal de décharge.

La photo de droite a été prise à l'arrière du moulin vers 1925 (Figure 2). Le canal d'amenée se situant au niveau de la route, on peut s'apercevoir que la hauteur de chute d'eau était supérieure à la hauteur d'un étage soit 3 mètres. Aujourd'hui la chute d'eau se trouve au début du canal de décharge.

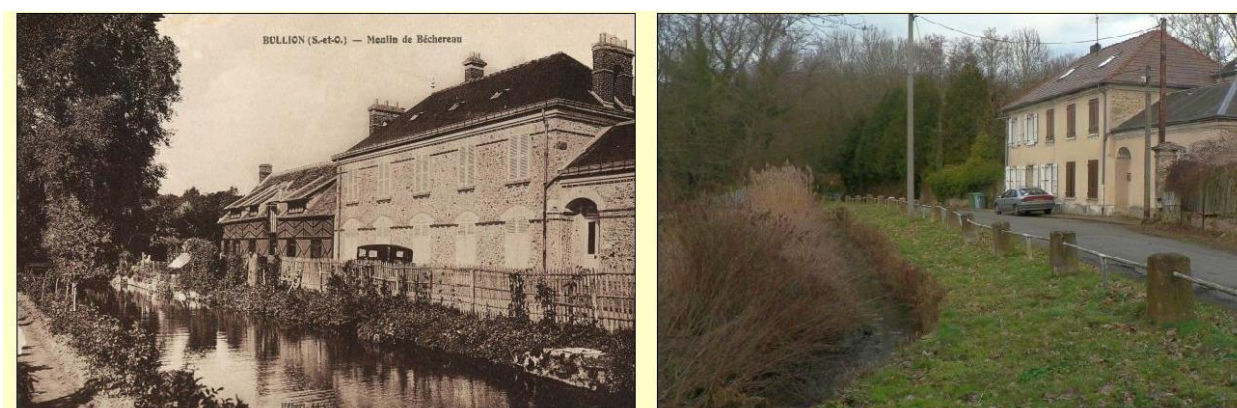


Figure 3 – Documents historiques sur le moulin de Béchereau : à gauche photo 1920, à droite photo 2010 (le bâtiment du moulin a entièrement disparu). Daniel Picard, www.hist-bullion.fr

Les deux photos visibles sur la Figure 3, prises au même endroit montre que dans les années 1920, le bief était beaucoup plus large qu'actuellement. Aujourd'hui, le moulin de Béchereau a été transformé en maison d'habitation et la chute d'eau sur le cours d'eau est de 2,30 mètres de hauteur (Figure 4).



Figure 4 – Chute sur le bief du moulin de Béchereau

2.3. La Mérantaise et le moulin d'Ors

2.3.1. Substratum géologique

L'amont de la Mérantaise est en contact avec les sables et grès de Fontainebleau. A l'aval, la formation sous-jacente est plastique et imperméable, composée essentiellement de marnes supragypseuses, glaises à corbules et argiles vertes. Le cours d'eau n'est plus en contact d'un aquifère, ce qui rend quasi nul les échanges nappe/rivière.

2.3.2. Evolution historique du tracé de la Mérantaise

La Mérantaise est une rivière du Bassin parisien jalonné par de nombreux ouvrages hydrauliques du fait de son anthropisation forte et ancienne, comme en atteste les cartes anciennes (Cassini, 1756) (Figure 5). Ces aménagements sont des moulins pour la plupart, accompagnés d'infrastructures diverses comme des systèmes de vannes ou des chutes (seuil).

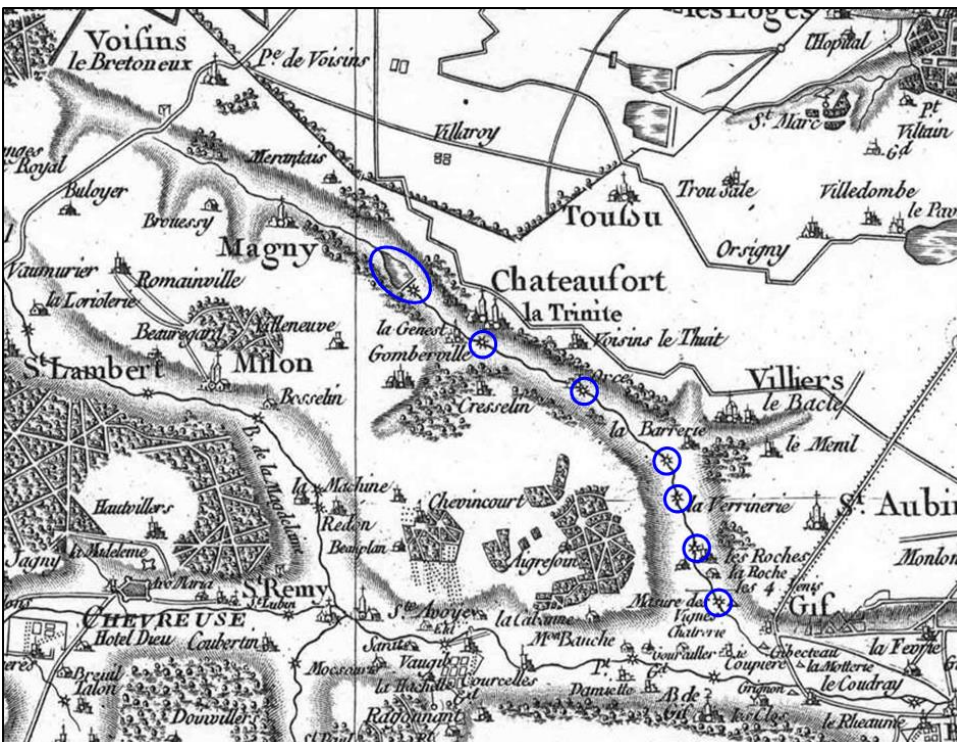


Figure 5 – Illustration de la présence des moulins de la Mérantaise sur la carte de Cassini (1756).

Une autre modification, imputable à l'homme et encore plus ou moins visible aujourd'hui, est celle des travaux de dérivation de la rivière. On observe à plusieurs endroits, généralement à proximité des moulins, deux bras de la Mérantaise. Il s'agit tout d'abord du bras d'amenée d'eau, bief principal du moulin, perché par rapport au fond de vallée et qui permettait d'augmenter la hauteur de chute et donc d'améliorer les capacités industrielles des moulins. Ensuite le canal de décharge, situé dans le fond de vallée et correspondant donc au cours naturel de la rivière. Les documents historiques le désigne alors sous le terme de « Morte rivière » (Figure 6).

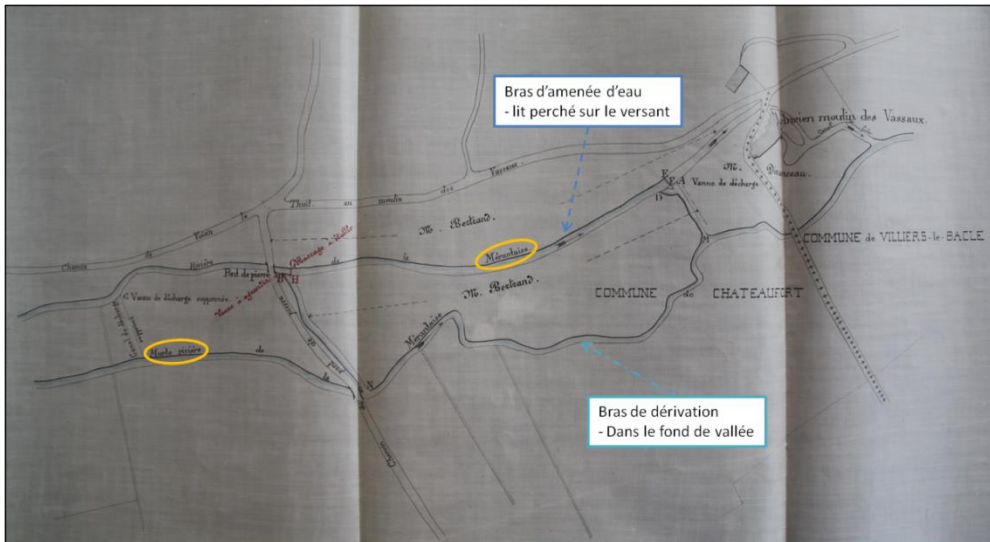


Figure 6 – Illustration des bras de dérivations de la Mérantaise pour l'usage des moulins (source: ADY).

2.3.3. Le moulin d'Ors et le seuil d'Ors

On dénombre actuellement sur 4,5 km de linéaire, 12 ouvrages hydrauliques sur la Mérantaise entre Les Vassaux et Mérançy, 8 sont jugés infranchissables ou partiellement franchissables selon les espèces considérées. Le seuil d'Ors est infranchissable et constitue la limite de colonisation amont de la truite de rivière (Figure 7).

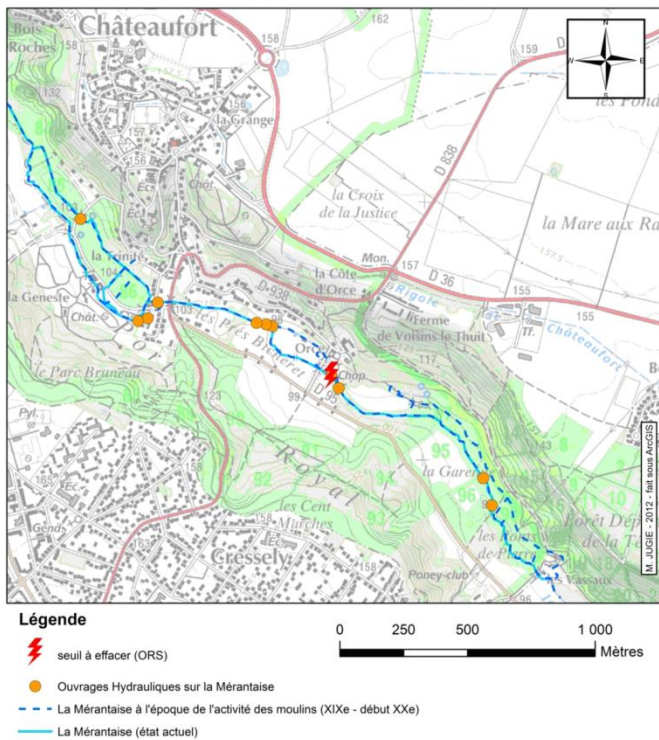


Figure 7 – Evolution historique des tracés de la Mérantaise avant et après l'activité des moulins (XIX et XXème siècle). Carte postale du Moulin d'Ors au début du XXème siècle (source: base Mérimée).

En 1921, un rapport de subdivisionnaire de la Préfecture de Seine et Oise (canton de Versailles) fixe le déclassement du moulin d'Ors : il cesse de fonctionner en tant qu'usine hydraulique (moulin à farine). Il est alors spécifié que (i) le cours de la rivière sera rétabli dans son ancien état ; (ii) que la vanne la plus en amont (A) sera supprimée et la maçonnerie sera démontée de façon à assurer l'écoulement des eaux avec un débouché de 1m et (iii) que « la morte rivière » sera remise en état, au moyen d'un curage à vif fond et à vieux bords, et lui sera donné la largeur d'1m (Figure 8).



Figure 8 – Extrait du rapport d'ingénieur de 1921 - illustration des lieux pour la désaffectation du moulin d'Ors. (source: ADY - 7S 112-114).

La présente étude concerne le seuil d'Ors, identifié sous la dénomination « MER 03 » par le PNR. Situé à proximité du moulin, en aval de la roue et après le pont de la route qui monte au moulin, il se trouve dans l'axe de l'ancien bras de décharge (« Morte rivière », sur les plans historiques anciens), aujourd'hui cours principal de la rivière. Ce seuil n'est pas visible sur le plan de 1921 (Figure 8) ; sa position approximative est figurée par un X rouge.



Figure 9 – Seuil d'Ors actuellement.

Large de 3 m / 4 m¹, ce seuil possède une hauteur de chute de 1,30 m. Au niveau de l'ouvrage (aval direct), la rive droite est une berge végétalisée sur une hauteur d'environ 1,80 m ; tandis que la rive gauche est occupée, sur environ 5 m, par un muret d'1,5m de haut (Figure 9). Concernant les hauteurs d'eau et la sédimentation au niveau du seuil, la profondeur moyenne est de 30 – 40 cm d'eau, à laquelle il faut ajouter 50 cm de vase.

¹ Mesures faites par le PNR HVC lors de l'inventaire des obstacles hydrauliques sur la Mérantaise.

3. Caractéristiques hydromorphologiques amont-aval des seuils d'Ors et de Béchereau

D'un point de vue hydromorphologique, deux questions apparaissent lors de la réflexion sur les enjeux d'un projet d'effacement de seuil : quel est le rôle de ce seuil et quels en sont les impacts actuels? Pour identifier les altérations physiques et biologiques causés par un ouvrage hydraulique, il est préconisé de réaliser un suivi hydromorphologique par une approche stationnelle en amont et aval du seuil, permettant de mettre en évidence une éventuelle modification de la géométrie du lit suite à l'effacement de l'ouvrage. L'objectif de la restauration étant la continuité écologique, l'échelle de réponse attendue du milieu est assez large. Le suivi est ainsi complété par un profil longitudinal du fond du lit sur une longueur permettant de mettre en évidence une éventuelle modification de l'équilibre dynamique du lit (stockage dans la retenue, incision à l'aval, etc.) (Figure 10). Les seuils ayant un effet net d'homogénéisation des faciès en amont, le suivi sera complété par une cartographie des faciès hydro-géomorphologiques sur l'ensemble du tronçon étudié. La mesure en continu de la hauteur d'eau et de la température fournit des variables complémentaires pour la compréhension de la dynamique du cours d'eau et des réponses biologiques.

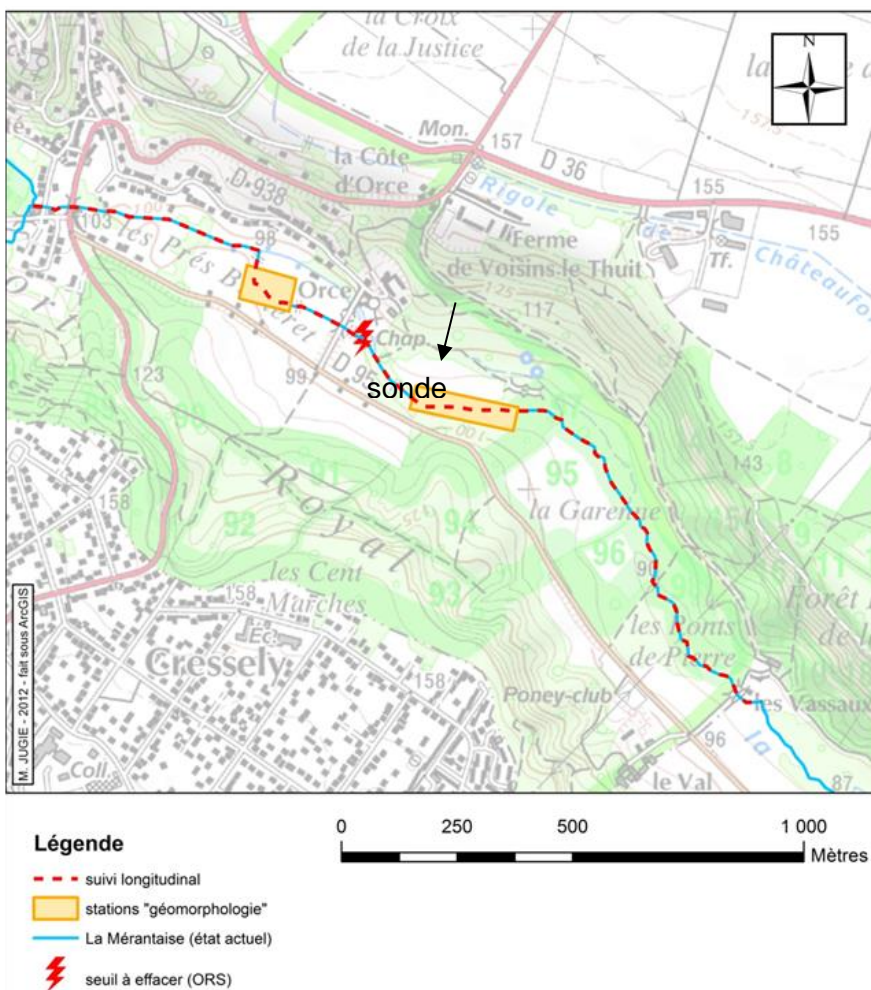


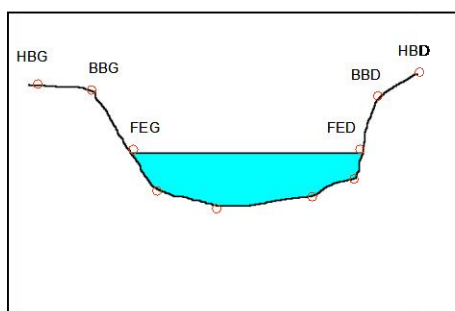
Figure 10 – Emprise spatiale des mesures stationnelles et longitudinales sur la Mérantaise.

3.1. Echelle stationnelle

3.1.1. Relevés de terrain (topographie, granulométrie)

Notre méthode se base sur le protocole mis au point par l'équipe Hydroécologie fluviale (HEF) de l'Irstea Antony dans le cadre de l'étude AESN menée entre 2008 et 2010, protocole qui a servi de base de référence pour définir le protocole simplifié CarHyCE (Caractérisation de l'Hydromorphologie des Cours d'eau) utilisé par l'ONEMA à l'échelle de toute la France.

Le protocole utilisé à l'échelle stationnelle consiste en un levé topographique de 15 transects selon la Figure 11 (Protocole en Annexe 1), accompagné généralement d'un jaugeage pour déterminer le débit (sauf si présence d'une station hydrométrique). Il comporte également une série de mesures de la granulométrie (méthode de Wolman, 1954) (Marion Jugie, 2012).



HBG: haut de berge gauche
HBD: haut de berge droit
BBG: bord de berge gauche
BBD: bord de berge droit
FEG: fleur d'eau gauche
FED: fleur d'eau droit
Autres points: chenal



Figure 11 – Les divers points de mesures du levé topographique réalisé à l'aide du tachéomètre.

Signification physique des principaux points caractéristiques relevés :

BBD : Bord de Berge Droit (BBG : Bord de Berge Gauche)

Il s'agit des points d'inflexion de la berge, qui marquent la limite du lit mineur, et qu'on prend comme niveaux de référence pour déterminer le « débit de plein bord » (Qpb).

HBD : Haut de Berge Droit (HBG : Haut de Berge Gauche)

Il s'agit des points qui marquent le début de l'inondation dans le lit majeur

FED : Fleur d'Eau Droit (FEG : Fleur d'Eau Gauche)

Il s'agit des points de contact entre la surface de l'eau et la berge, très importants pour caractériser les conditions d'écoulement au débit observé (niveau d'eau, largeur mouillée).

Quatre stations ont été étudiées : une en amont et une en aval des deux seuils. Ces relevés ont été effectués en novembre / décembre 2011, à un seul débit Q1 de basses eaux.

Cours d'eau	Station	Date du relevé terrain	Débit Q1 jaugé (m ³ /s)
Aulne	Béchereau amont	05/12/2011	0,055
Aulne	Béchereau aval	22/11/2011	0,030
Mérantaise	Ors amont	17/11/2011	0,053
Mérantaise	Ors aval	15/11/2011	0,061

Il n'a pas été possible d'effectuer une deuxième campagne de relevé à un deuxième débit de hautes eaux Q2, comme recommandé pour mieux appréhender le fonctionnement des cours d'eau sur toute la gamme de débits dans le lit mineur et déterminer avec plus de précision le débit de plein bord. Les montées des eaux sont rapides et de courte durée sur ces cours d'eau ce qui rend très difficile l'organisation de campagnes de terrain de hautes eaux.

3.1.2. Détermination des caractéristiques à plein bord

Le débit plein bord sur chaque station et les caractéristiques de l'écoulement associées à ce débit ont été déterminés à l'aide d'un modèle hydraulique de calcul de ligne d'eau en régime permanent (logiciel Fluvia, mis au point à Irstea), calé sur les mesures observées au débit Q1. L'étape de calage consiste à déterminer la valeur du coefficient de Strickler (paramètre représentant la résistance à l'écoulement dans le lit mineur²) qui permet de retrouver au plus près la ligne d'eau observée au débit Q1 avec le modèle Fluvia (Figure 12).

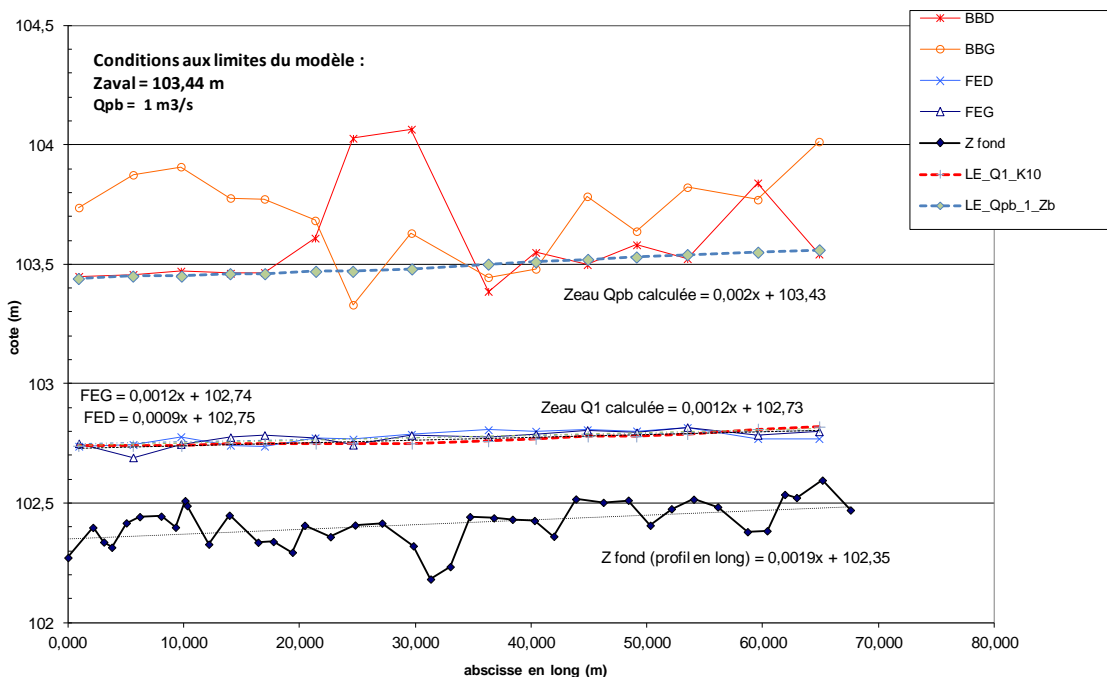


Figure 12 – Calculs de ligne d'eau (LE) avec Fluvia sur l'Aulne à Béchereau amont

² Le coefficient de Strickler, dans ce type de modèle, intègre toutes les sources de résistance à l'écoulement réparties : le frottement « de peau » (influence de la granulométrie du fond) mais aussi les irrégularités du lit, la présence de végétation, d'embâcles...

Cette valeur du coefficient de Strickler est ensuite adoptée pour simuler les écoulements à d'autres débits. On ne tient donc pas compte d'une éventuelle variation de ce coefficient avec le débit. Sous réserve de cette approximation sur le Strickler, la deuxième étape consiste à déterminer le débit qui donne une ligne d'eau calculée correspondant au mieux au niveau « bords de berge » relevé sur le terrain, vu à l'échelle de l'ensemble de la station (hors point singuliers éventuels comme des murets de soutènement...). Dans cet exercice d'expert on tient compte également de la pente de la ligne d'eau observée à Q1 et de la pente du fond du lit.

Les résultats obtenus sur les 4 stations sont présentés *Tableau 1*.

Tableau 1 – Calcul des débits plein bord aux 4 stations avec Fluvia

Cours d'eau	Station	Débit observé Q1 (jaugeage) en m ³ /s	K (Coefficient de Strickler) calé sur ligne d'eau à Q1	Qpb calculé (avec K = celui de Q1) en m ³ /s
Aulne	Béchereau amont	0,055	10	1
Aulne	Béchereau aval	0,030	10	2
Mérantaise	Ors amont	0,053	10	4
Mérantaise	Ors aval	0,061	12	3,5

Ces estimations sont approximatives compte-tenu des éléments suivants :
débit observé Q1 très faible : incertitudes sur la mesure du débit lui-même (jaugeage) et situation observée très éloignée de celle au débit plein bord
hypothèse que le coefficient de Strickler (K) est le même à plein bord qu'à Q1 : le Qpb pourrait être un peu sous-estimé
ligne de « bord de berge » parfois un peu « chaotique » (Béchereau aval)
... mais c'est le mieux qu'on puisse faire en l'absence d'un débit observé Q2 de hautes eaux.

Les tests comparatifs effectués au cours de l'étude AESN ont montré que les débits plein bord calculés avec Fluvia ne s'écartaient pas de plus de 10 % en général (20 % pour les plus petits cours d'eau) de la valeur obtenue par une loi d'ajustement basée sur 2 campagnes d'observation à 2 débits distincts Q1 et Q2.

3.1.3. Granulométrie

- Aulne, station amont

La station Aulne amont se trouve en amont de la chute de Béchereau avec un chenal d'une pente faible de 0,19%. La taille des sédiments du lit mineur n'excède jamais celui du sable grossier (0,5-1,0 mm) (Figure 13). Le chenal est incisé avec un rapport largeur/profondeur plein bord faible de 6,8. Les débits supérieurs au plein bord ont été réalisés plusieurs fois pendant l'étude comme en témoignent les dépôts sédimentaires sur le lit majeur. La sinuosité est faible. Les faciès sont largement limités aux plats lenticulaires. Les berges sont boisées. Les changements de rugosité viennent des dépôts ligneux.

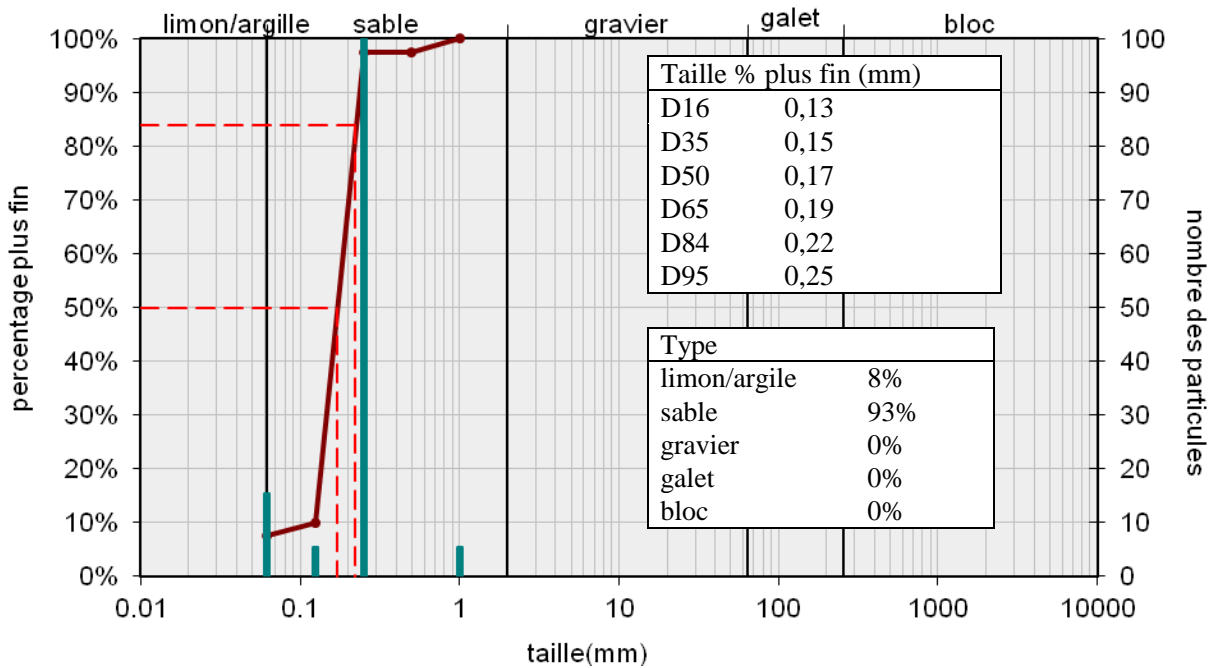


Figure 13 – La station Aulne en amont : granulométrie ; la courbe rouge représente le pourcentage cumulé et les barres vertes, la distribution du nombre de particules.

Le rapport largeur/profondeur faible et la courbure des troncs d'arbres suggèrent une histoire d'incision (Figure 14). Désormais, les tailles de sédiments fins, une pente faible, et les pieds des berges effondrées suggèrent que le chenal a commencé une période d'élargissement avec un potentiel exhaussement du lit mineur par dépôt des sédiments des berges érodées.



Figure 14 – La station Aulne en amont : chenal incisé en train de s'élargir.

- Aulne, station aval

La station Aulne aval se trouve en aval de la chute de Béchereau et d'un pont avec un chenal d'une pente de 0,75%. La taille des sédiments du lit mineur n'excède pas celui de galet moyen (90-128 mm) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le chenal est incisé avec un rapport largeur/profondeur plein bord faible de 7,6. Les débits supérieurs au plein bord ont pris place plusieurs fois pendant l'étude comme en témoignent les dépôts sédimentaires sur le lit majeur. La sinuosité est légèrement développée. Au débit de base, les faciès comprennent des radiers, des mouilles, et des plats courants et lenticles. Les berges sont couvertes de végétation, d'arbres et de plantes grimpantes.

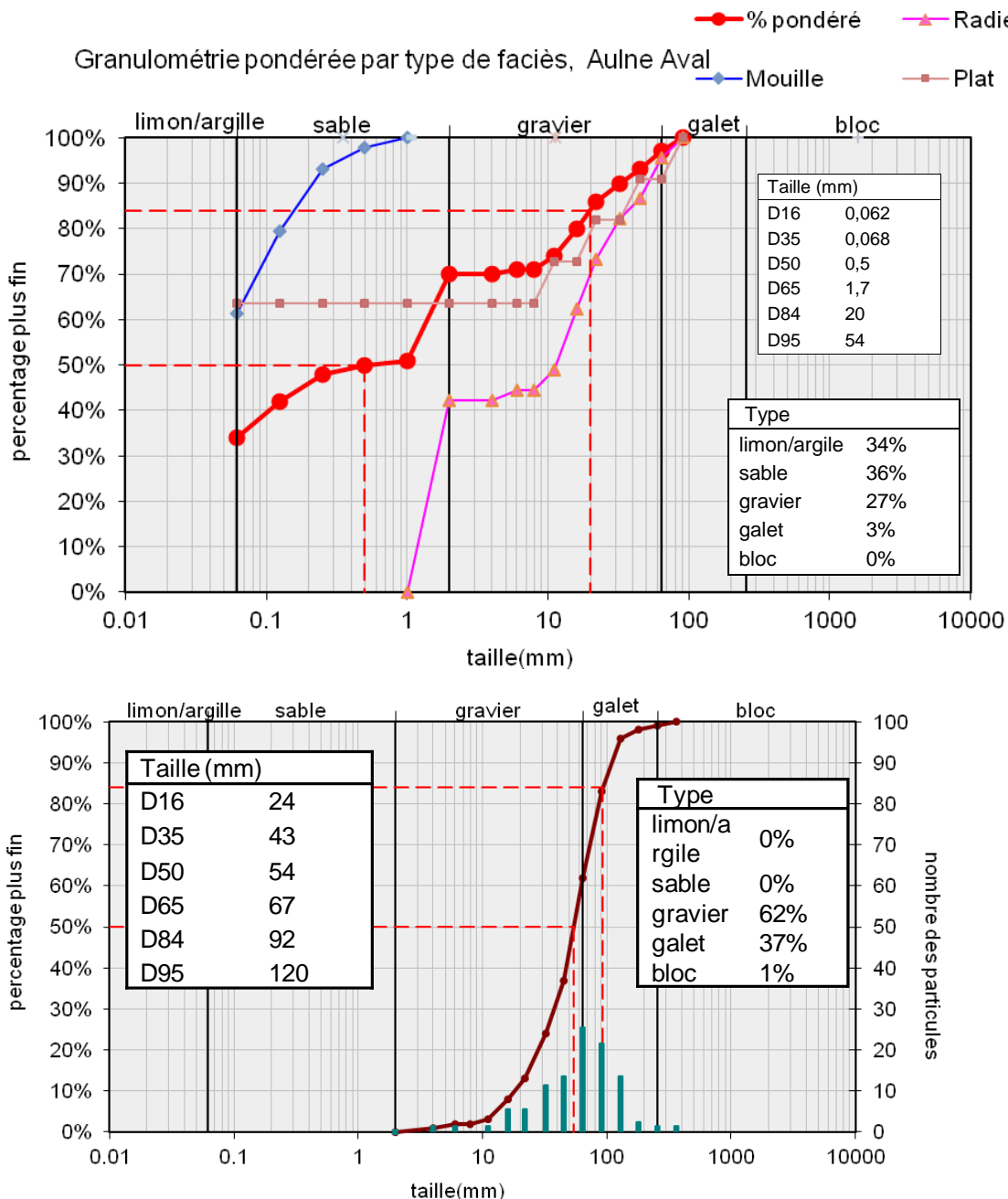


Figure 15 – La station Aulne en aval : granulométrie pondérée par faciès et granulométrie d'un radier.

Le rapport largeur/profondeur faible et la courbure des troncs d'arbres suggèrent une histoire d'incision suivie par une période d'élargissement. Désormais, les tailles de sédiments de la gamme

du gravier au galet et les méandres modérés qui migrent latéralement suggèrent que le chenal a commencé une période de diminution de la pente du lit mineur.



Figure 16 – La station Aulne en aval : chenal incisé avec de légers méandres.

- Evolution temporelle des mesures granulométriques sur l’Aulne suite à la crue 2016

	station amont		
	2011	2016	2018
d16 (mm)	0.13	0.2	0.14
d50 (mm)	0.17	0.32	0.28
d84 (mm)	0.22	0.44	0.46
total pesées (g)	200	445.6	2205.4

	station aval		
	2011	2016	2018
d16 (mm)	24	12	29
d50 (mm)	54	47	53
d84 (mm)	92	83	80
100 éléments mesurés sur un radier			

Sur la station aval, les valeurs sont relativement similaires au cours du temps, mis à part le d16 qui est plus faible en 2016, sans doute en lien avec des apports de sables de l’amont.

Sur la station amont, le prélèvement de 2011 était constitué uniquement de sable. Des particules plus grossières ont été trouvées dans les prélèvements suivants, ce qui explique l’augmentation du volume utilisé pour réaliser la granulométrie. Les résultats de 2016 et 2018 sont similaires, il est possible que des particules aient été transportées et déposées sur le tronçon étudié suite à la crue de mai 2016.

- Mérantaise, station amont

La station amont se trouve en amont de la chute d'Ors et d'un pont avec une pente de 0,41%. La taille de sédiment du lit mineur n'excède pas celui de galet moyen (128-180 mm) (Figure 17). Le débit plein bord (4 m³/s) permet de mobiliser une taille sédimentaire de 33 mm, gravier très grossier, indiquant qu'environ 50% du radier et environ 95% du lit mineur peuvent être mobilisés au débit plein bord. Le chenal est incisé avec un rapport largeur/profondeur plein bord faible de 6,3. La sinuosité est faible. Les faciès sont limités aux plats courants, radiers, et mouilles peu profondes. Les berges sont bien végétalisées avec des espèces de prairie.

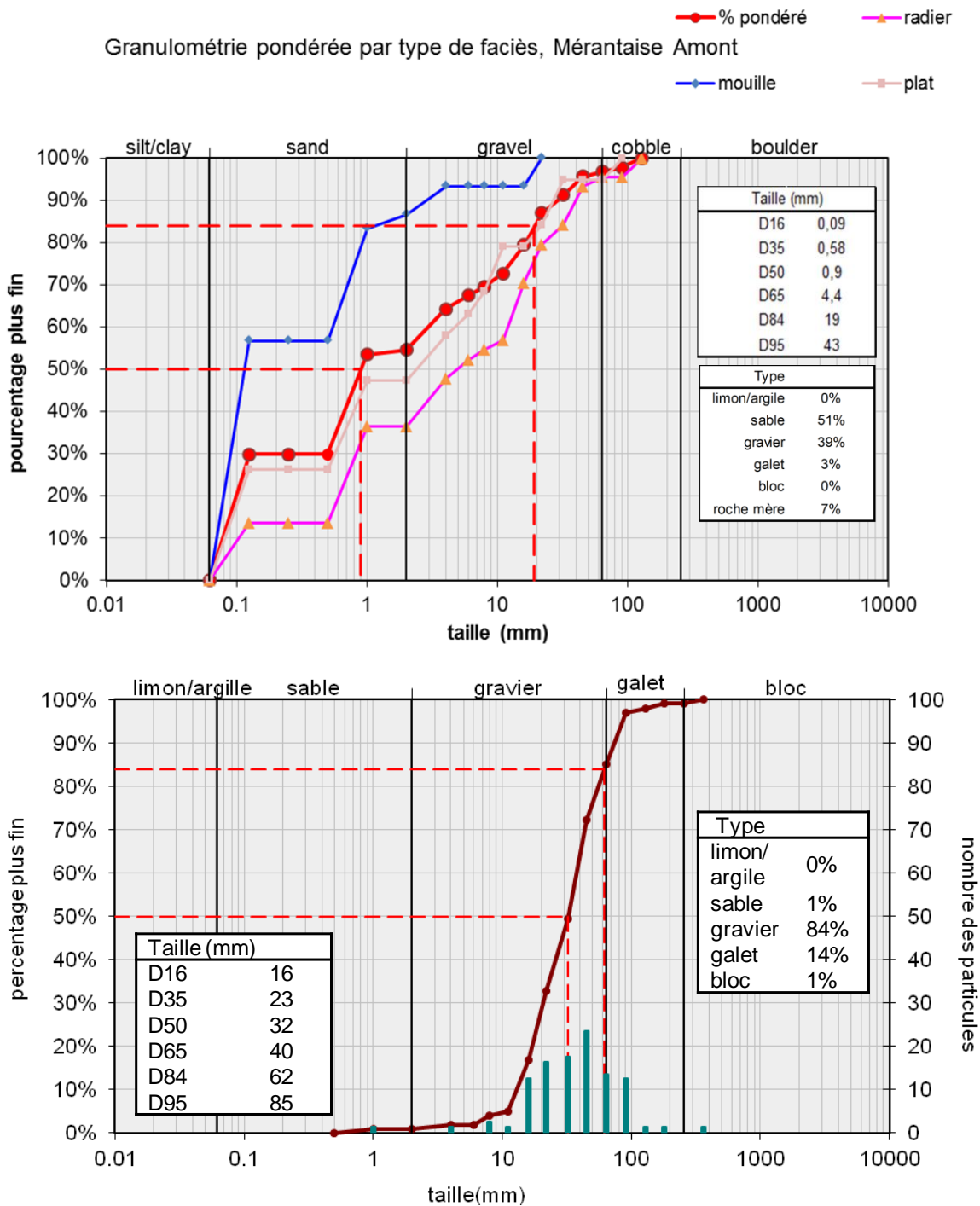


Figure 17 – La station Mérantaise en amont: granulométrie pondérée par faciès et granulométrie d'un radier.

Le rapport largeur/profondeur faible suggère une histoire d'incision. Désormais, les tailles de sédiments de la gamme du sable au gravier et les berges stables suggèrent que le chenal est quasi-équilibré au régime hydrologique et sédimentaire.



Figure 18 – La station Mérantaise en amont : chenal incisé et quasi-équilibré.

- Mérantaise, station aval

La station Mérantaise en aval se trouve en aval de la chute d'Ors et d'un collecteur d'eaux usées avec une pente de 0,43%. La taille des sédiments du lit mineur n'excède pas celle de du galet moyen (90-128 mm) (Figure 19). Le chenal est incisé avec un rapport largeur/profondeur plein bord faible de 6,7. La sinuosité est faible. Les faciès incluent des plats courants, radiers, et mouilles. Dans la première moitié du secteur étudié, la berge gauche est érodée et sans végétation et la berge droite est boisée et emmurée. La deuxième partie du secteur a des berges assez stables et bien végétalisées.

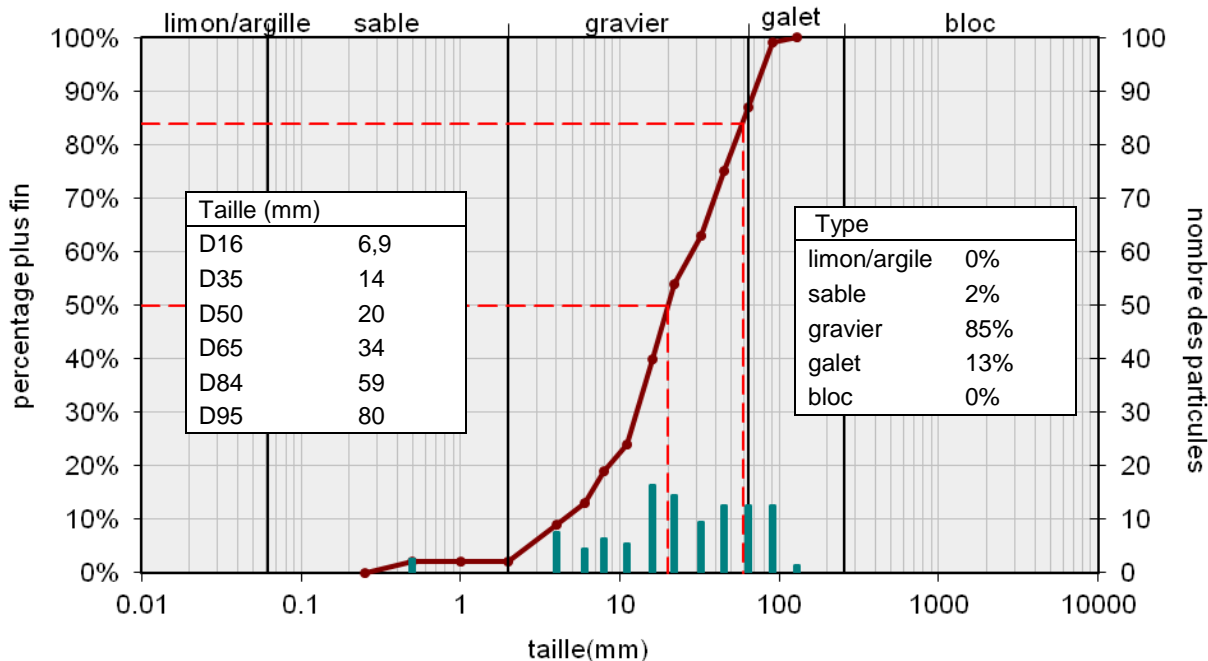
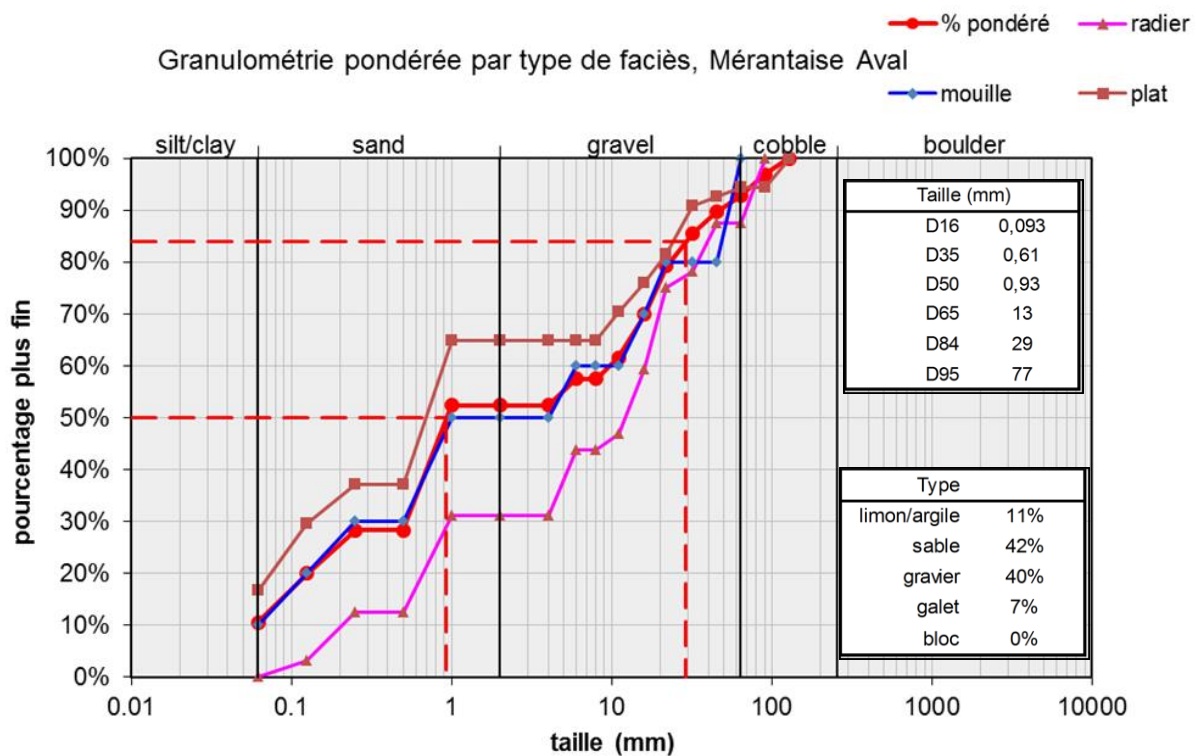


Figure 19 – La station Mérantaise en aval: granulométrie pondérée par faciès et granulométrie d'un radier.

Le rapport largeur/profondeur faible suggère une histoire d'incision. Désormais, les tailles de sédiments de la gamme du gravier au galet et les berges stables suggèrent que la deuxième partie du chenal est quasi-équilibrée au régime hydrologique et sédimentaire. Pour la première partie, l'érosion forte et latérale de la berge gauche peut être le résultat de l'érodabilité différentielle de la berge gauche nue à la berge droite boisée et emmurée.



Figure 20 – La station Mérantaise en aval : chenal incisé de la première partie.

- Mobilisation de la charge sédimentaire

Tableau 2 – Analyses de la compétence des débits calculés à mobiliser la charge du lit.

Cours d'eau	Station	Qpb calculé (m³/s)	Taille critique (mm) de mise en mouvement des sédiments à Qpb	Dx mobilisable à Qpb (%)	D50 (mm)	D84 (mm)	Qc mouvement D84 (m³/s) (fréquence de non dépassement, % par rapport au Qpb)
Aulne	Béchereau amont	1	12 gravier moyen	100	0,17 sable fin	0,22 sable fin	Tous les débits ($\approx 0\%$, $\approx 0\%$)
Aulne	Béchereau aval	2	42 gravier très grossier	92	0,5 sable grossier	20 gravier grossier	$\approx 0,4$ ($\approx 95\%$, 20%)
Mérantaise	Ors amont	4	33 gravier très grossier	92	0,9 sable grossier	19 gravier grossier	$\approx 0,5$ ($\approx 98\%$, 12.5%)
Mérantaise	Ors aval	3,5	37 gravier très grossier	88	0,93 sable grossier	29 gravier très grossier	$\approx 3,1$ ($> 100\%$, 89%)

Le Tableau 2 présente pour les 4 stations la taille critique de mise en mouvement des sédiments pour le Qpb calculé, et la fraction sédimentaire associée. La fraction sédimentaire Dx s'exprime en mm : x% des sédiments ont un diamètre inférieur à Dx.

Le seuil de mise en mouvement a été déterminé en prenant un paramètre de Shields égal à 0,06. Le paramètre de Shields τ^* est un paramètre adimensionnel calculé selon l'équation :

$$\tau^* = \frac{\rho_e i R_H}{(\rho_s - \rho_e) d}$$

Avec :

ρ_e : masse volumique de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$)

ρ_s : masse volumique sédimentaire ($\approx 2650 \text{ kg/m}^3$)

R_H : rayon hydraulique (surface mouillée / périmètre mouillé, m)

i : pente du lit (m/m)

d : taille des grains (m)

Une particule de diamètre d pourra être entraînée si $\tau^* > 0,06$. Le rayon hydraulique est calculé pour le débit de plein bord Q_{pb} , ce qui permet ensuite de déterminer la taille maximale des sédiments pouvant être mobilisés. La fraction sédimentaire D_x associée est ensuite déterminée à l'aide des mesures granulométriques.

Le débit critique Q_c d'entraînement est aussi estimé pour le D84 sur chaque station, en reprenant le coefficient de Strickler donné dans le Tableau 1. Ce débit est comparé au débit de plein bord, et sa fréquence est estimée à l'aide de la courbe des débits classés (cf. Figure 33).

Pour la station d'Ors amont, le D84 est de 19 mm. Il peut être mobilisé par un débit d'environ $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, dont la fréquence de non dépassement est d'environ 98%, d'après la courbe des débits classés (cf. figure 31). Le débit qui peut mobiliser le D84 représente seulement 12,5% du Q_{pb} calculé. Donc, on peut dire que la charge potentielle du lit risque d'être mobilisée pour un débit beaucoup plus faible que le Q_{pb} . Le cas est presque le même à la station Béchereau aval où le débit mobilisant le D84 est égal à 20% du Q_{pb} . De même sur la station d'Ors aval, le D84 peut être mobilisé pour un débit équivalent à environ 89% du débit de plein bord.

Sur ces deux stations, le débit Q_c susceptible de mobiliser le D84 est largement inférieur au débit de plein bord. Dans ces deux cas, la période de retour du Q_c est relativement faible et ces débits ont été observés plusieurs fois durant la période de mesure. L'existence de débits potentiellement morphogène à même de mobiliser régulièrement la charge sédimentaire du lit tend à montrer que les cours d'eau ont la capacité d'adapter leur morphologie sur ces stations.

Pour la station d'Ors aval, le débit mobilisant le D84 est 89% du Q_{pb} et peu probable avec une fréquence de non dépassement de 100%. Ce tronçon n'a pas la capacité de s'adapter en érodant la charge du lit parce que le débit qui peut mobiliser le D84 est rare. Des ajustements se réaliseraient plutôt dans le sens latéral. Pour la station Béchereau amont, même les débits les plus faibles sont susceptibles de mobiliser le D84. La faible distribution des tailles sédimentaires ($D_{16} = 0,13 \text{ mm}$ to $D_{95} = 0,25 \text{ mm}$) indique la possibilité d'un effet de réduction des vitesses en amont d'un seuil qui s'entend jusqu'à cette station. La sédimentation très fine de cette station pourrait être le signe d'un processus d'accumulation sédimentaire.

Tableau 3 – Récapitulatif des caractéristiques en 2011 de la géométrie moyenne du chenal au débit plein bord et des sédiments du lit mineur : Aulne et Mérantaise.

Cours d'eau	Aulne	Aulne	Mérantaise	Mérantaise
Station	Béchereau amont	Béchereau aval	Ors amont	Ors aval
Caractéristiques du lit mineur				
Pente du fond du lit mineur (m/m)	0,0019	0,0075	0,0041	0,0043
Taille de sédiments D16 (mm)	0,13	0,06	0,09	0,09
Taille de sédiments D50 (mm)	0,17	0,5	0,9	0,93
Taille de sédiments D84 (mm)	0,22	20	19	29
Caractéristiques écoulement à plein bord (valeurs moyennes sur les 15 transects)				
Débit plein bord calculé (m ³ /s)	1	2	4	3,5
Pente ligne d'eau (m/m)	0,002	0,0075	0,0066	0,0055
Tirant d'eau Y (hauteur d'eau maxi) (m)	1,1	1,0	1,6	1,3
Hauteur d'eau moyenne H (m)	0,7	0,7	1,0	0,9
Largeur au miroir L (m)	4,8	5,2	6,1	6,0
Rayon hydraulique Rh (m)	0,6	0,6	0,8	0,8
Ratio L/H	6,8	7,6	6,3	6,7
Puissance spécifique (W/m ²)	4,1	28,1	42,4	31,5
Taille maxi de sédiment mobilisable (mm)	12	44	33	33

La comparaison des stations amont / aval sur chaque cours d'eau montre que :

- il n'y a pas de différence notable, sur l'ensemble des caractéristiques étudiées, entre la station amont et la station aval de la Mérantaise ; l'influence du seuil d'Ors n'est pas détectable au niveau du fonctionnement hydromorphologique
- il y a par contre une nette différence entre les stations amont et aval de l'Aulne ; la présence de l'ouvrage de Béchereau (plus haut que celui d'Ors) a provoqué des dépôts de sédiments et une diminution de la pente du lit en amont ; cet ajustement se traduit aussi par une diminution de la capacité d'écoulement du lit mineur avant débordement (débit à plein bord) et de la puissance spécifique du cours d'eau.

3.1.4. Evolution temporelle de la morphologie de l'Aulne après la crue de juin 2016

Les mêmes campagnes de mesures ont été effectuées après la crue de juin 2016 pour étudier les évolutions des caractéristiques hydromorphologiques suite à cet évènement extrême.

Calcul de la pente :

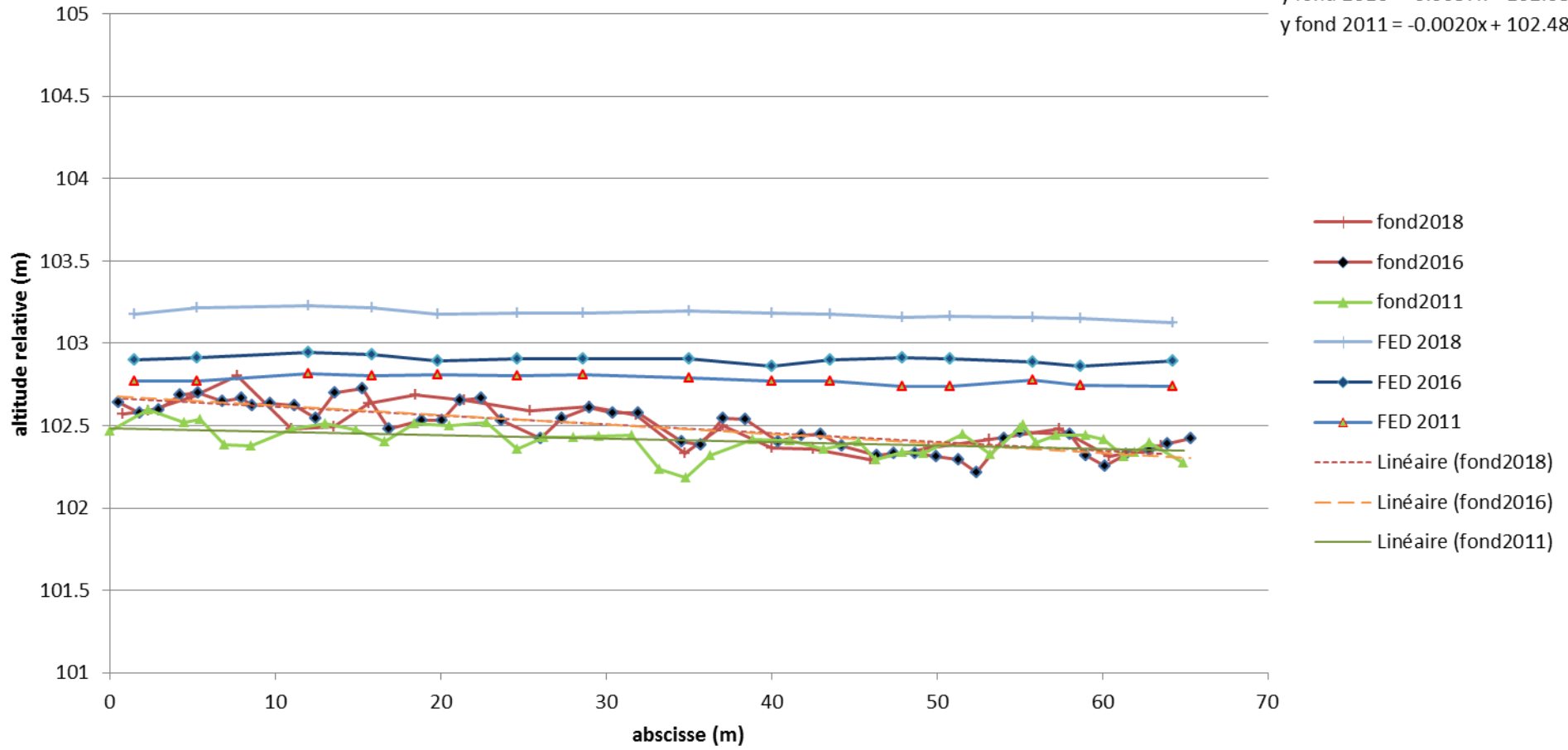
Pour obtenir ces résultats seule les parties communes aux trois années de relevé ont été conservées. Les valeurs de pente sont reprises de l'équation de la droite de régression linéaire sur le profil en long.

En amont, la pente du fond passe de 0.2% en 2011 à 0.57% en 2016 et 0.49% en 2018 (valeur reprise de l'équation de la droite de régression linéaire sur le profil en long). L'altitude de la moitié amont du lit du tronçon étudié semble s'élever légèrement au cours du temps.

En aval, La pente du fond passe de 0.72% en 2011 à 0.62% en 2016 puis 0.76% en 2018. L'altitude du fond du lit est descendue d'environ 12cm entre 2011 et 2018.

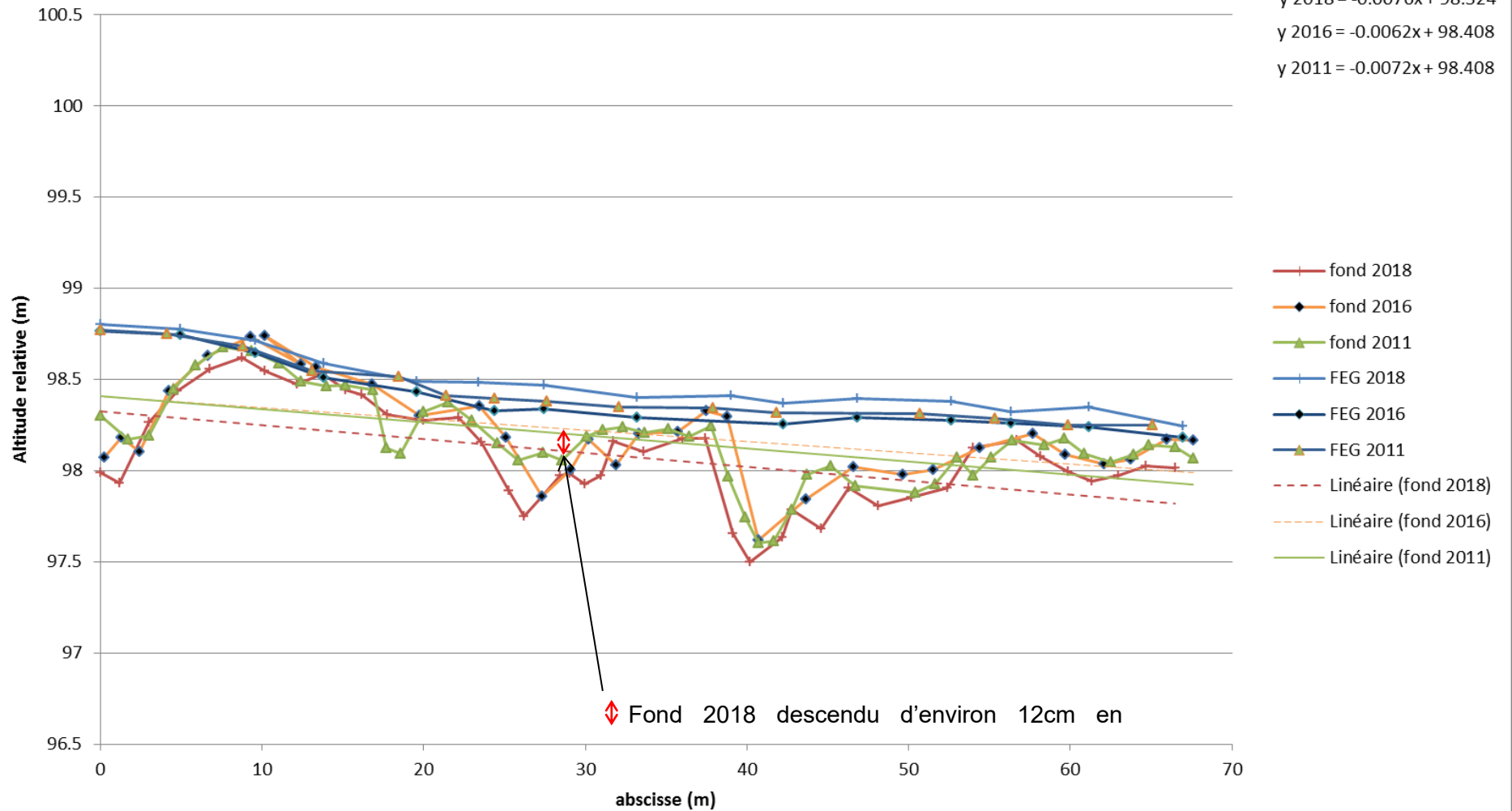
profil en long Aulne amont

y fond 2018 = $-0.0053x + 102.67$
 y fond 2016 = $-0.0057x + 102.68$
 y fond 2011 = $-0.0020x + 102.48$



profil en long Aulne aval

$y_{2018} = -0.0076x + 98.324$
 $y_{2016} = -0.0062x + 98.408$
 $y_{2011} = -0.0072x + 98.408$

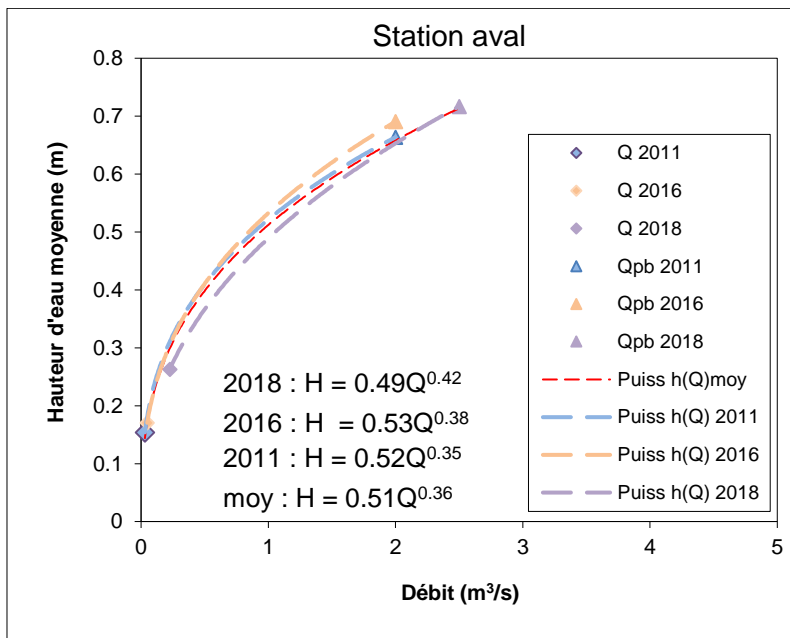
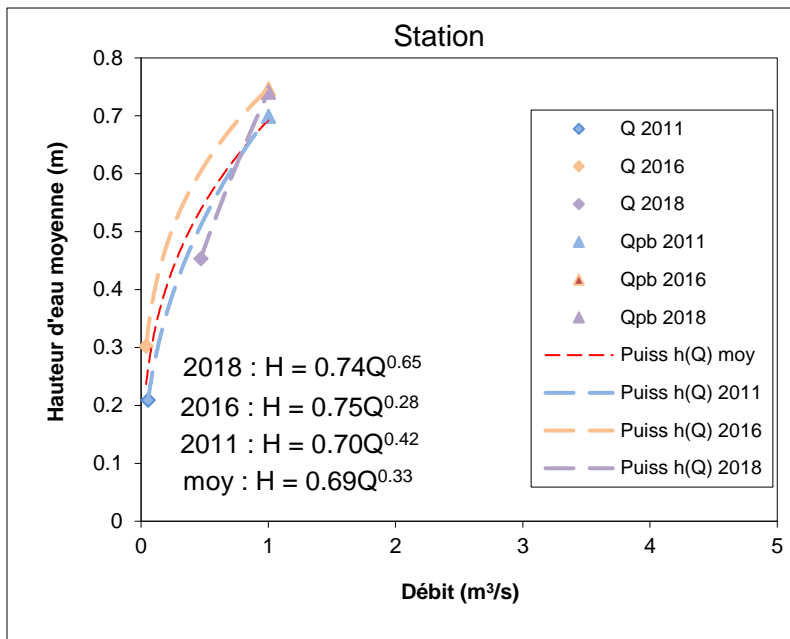


◇ Fond 2018 descendu d'environ 12cm en

Caractéristiques à plein bord :

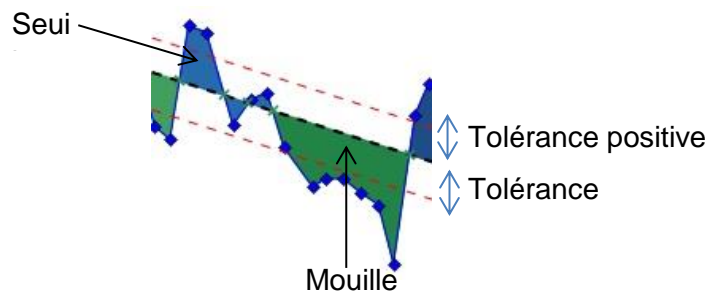
	débit (m ³ /s)	tirant d'eau (m)	V lit total (m/s)	Froude	Largeur miroir (m)	Périmètre mouillé (m)	R hydraulique	Surface mouillée (m ²)
station amont								
moyenne Béchereau amont 2011	1 (Qpb)	1.07	0.3	0.11	4.79	5.55	0.6	3.35
moyenne Béchereau amont 2016	1 (Qpb)	1.19	0.27	0.1	4.96	5.83	0.64	3.73
moyenne Béchereau amont 2018	1 (Qpb)	1.16	0.27	0.1	5.11	5.86	0.65	3.79
station aval								
Moyenne Béchereau aval 2011	2 (Qpb)	0.99	0.6	0.24	5.23	6.01	0.59	3.59
Moyenne Béchereau aval 2016	2 (Qpb)	1.03	0.59	0.23	5.35	6.12	0.59	3.69
Moyenne Béchereau aval 2018	2 (pour comparai son)	1.11	0.54	0.21	5.9	6.66	0.61	4.13
	2.5 (Qpb)	1.14	0.65	0.25	6	6.78	0.62	4.3

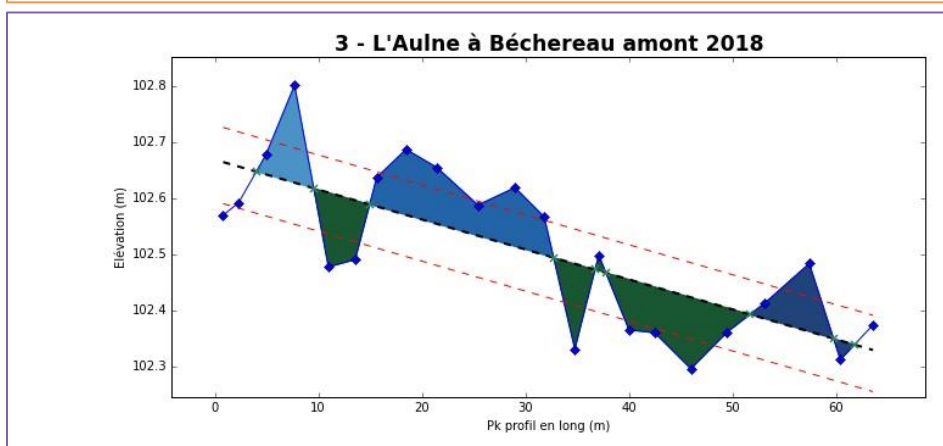
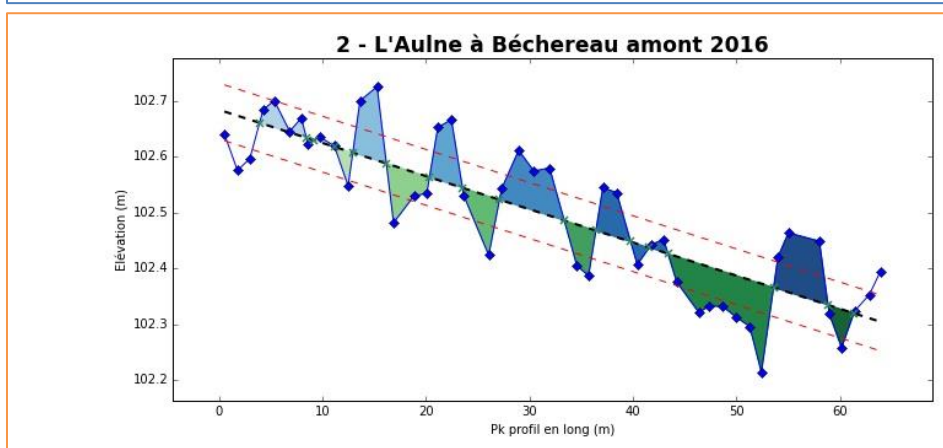
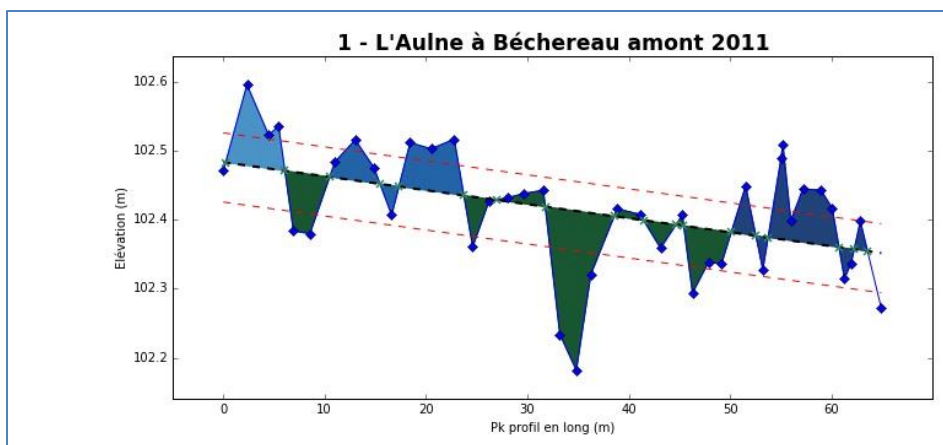
Sur la station amont, les caractéristiques générales du tronçon semblent stables au cours du temps. Sur la station aval, les valeurs de la géométrie du cours d'eau ont tendance à augmenter. En revanche, la relation débit/hauteur est plus stable sur la station aval que sur la station amont.



Succession seuil/mouille :

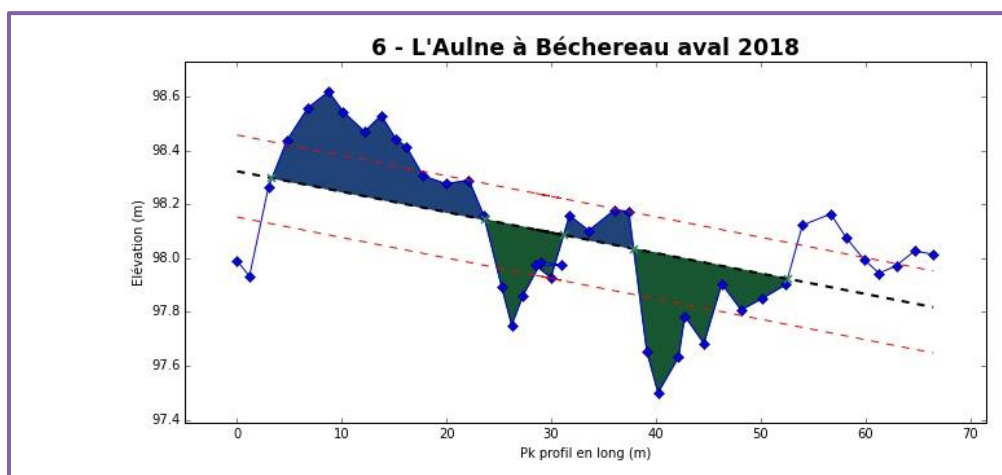
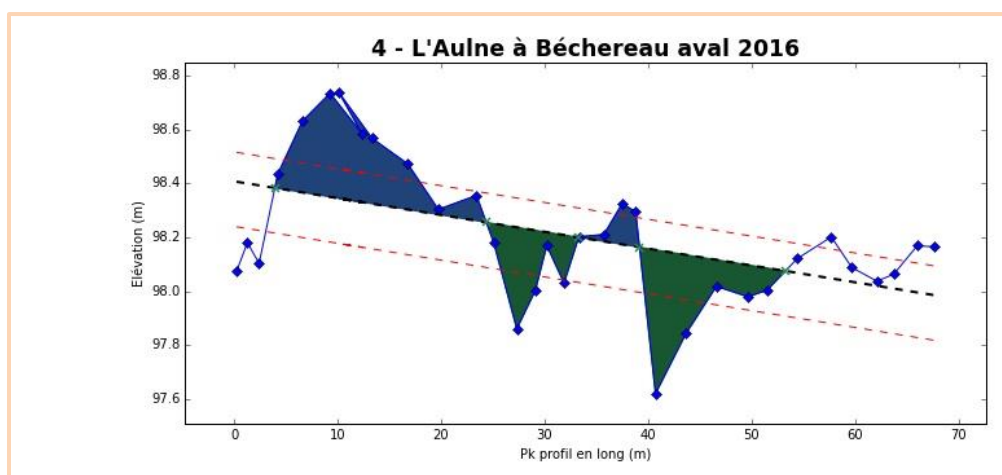
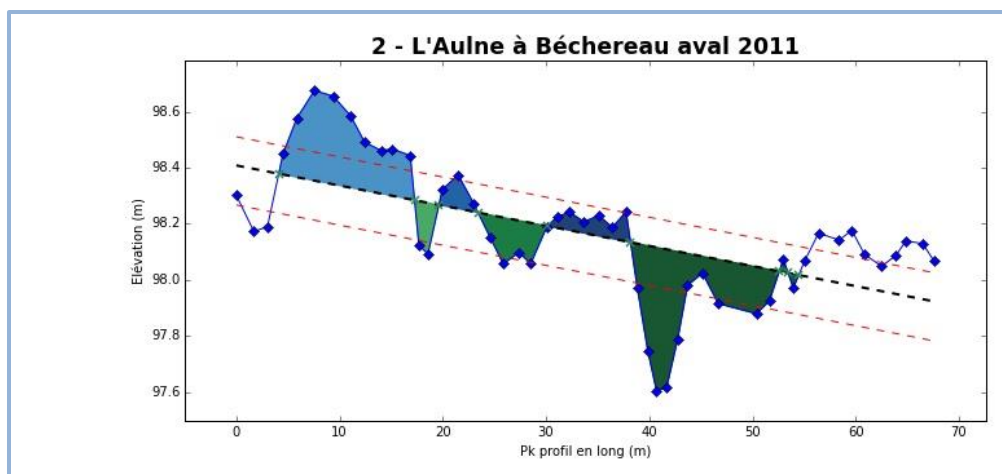
Méthode à décrire





Site	Nb mouilles	Prof. mouille max (m)	Prof. mouilles moy (m)	Long. mouilles moy (m)
L'Aulne à Béchereau amont 2011	2	0.231	0.159	15.401
L'Aulne à Béchereau amont 2016	6	0.166	0.1	4.296
L'Aulne à Béchereau amont 2018	2	0.149	0.134	12.126
	Nb seuils	Haut. seuil max (m)	Haut. seuils moy (m)	Long. seuils moy (m)
L'Aulne à Béchereau amont 2011	3	0.138	0.112	10.848
L'Aulne à Béchereau amont 2016	6	0.133	0.096	5.332
L'Aulne à Béchereau amont 2018	3	0.188	0.143	10.602

Ces résultats sont difficilement exploitables car l'amplitude maximum entre les points n'est que de 40cm en 2011 et 50cm pour les années suivantes. Il n'y a pas réellement de succession seuil – mouille sur ce tronçon.



Site	Nb mouilles	Prof. mouille max (m)	Prof. mouilles moy (m)	Long. mouilles moy (m)
L'Aulne à Béchereau aval 2011	3	0.512	0.287	8.471
L'Aulne à Béchereau aval 2016	2	0.533	0.455	11.511
L'Aulne à Béchereau aval 2018	2	0.518	0.446	11.115
	Nb seuils	Haut. seuil max (m)	Haut. seuils moy (m)	Long. seuils moy (m)
L'Aulne à Béchereau aval 2011	3	0.321	0.182	8.321
L'Aulne à Béchereau aval 2016	2	0.392	0.272	13.144
L'Aulne à Béchereau aval 2018	2	0.363	0.249	13.5

Les résultats sont similaires entre 2016 et 2018, une petite mouille visible en 2011 n'est plus apparente sur les relevés suivant. Ceci a pour effet de modifier les valeurs moyennes entre les résultats de 2011 et les suivants mais les valeurs maximum de profondeur des mouilles restent très proches.

3.2. Echelle longitudinale

3.2.1. Profil en long de l'Aulne

Le profil en long couvre 3 700 m de linéaire, depuis la station géomorphologique amont jusqu'à la confluence avec le Ru de Saint Anne. Ces bornes ont été choisies afin d'avoir le profil en long du cours d'eau sur le secteur d'étude des truites marquées. Nous pouvons donc y voir deux obstacles : la chute du Moulin de Béchereau et la chute de la Galetterie.

On y découvre un certain nombre d'éléments remarquables concernant la pente du lit mineur. Sur l'Aulne, la pente moyenne générale du lit du profil en long est de 0,31% (Figure 21). Elle a été déterminée grâce à la courbe de tendance de la droite allant du premier au dernier point du profil en long. Le dernier point du profil est la confluence avec le Ru de Saint Anne et peut agir comme contrôle de pente.

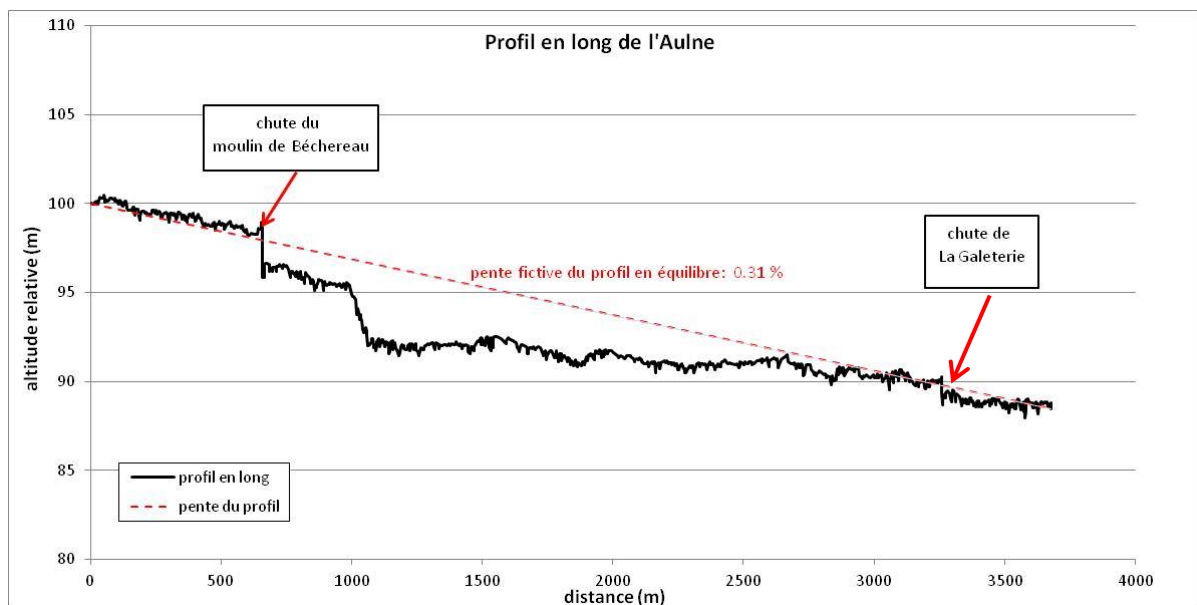


Figure 21 – Profil en long de l'Aulne, présentant les 2 seuils majeurs.

Le seuil du moulin de Béchereau est l'obstacle le plus important dans ce secteur (2,86 m de chute). Le seuil de La Galetterie est moins important (0,83 m de chute). La pente du lit mineur de 1 000 à 3 100 m est seulement 0,1%, comparé au secteur immédiatement en amont, dont la forte pente s'observe à l'aval d'un pont en ruine (Figure 21). Le pont et le seuil de La Galetterie contrôlent la pente de ce tronçon.

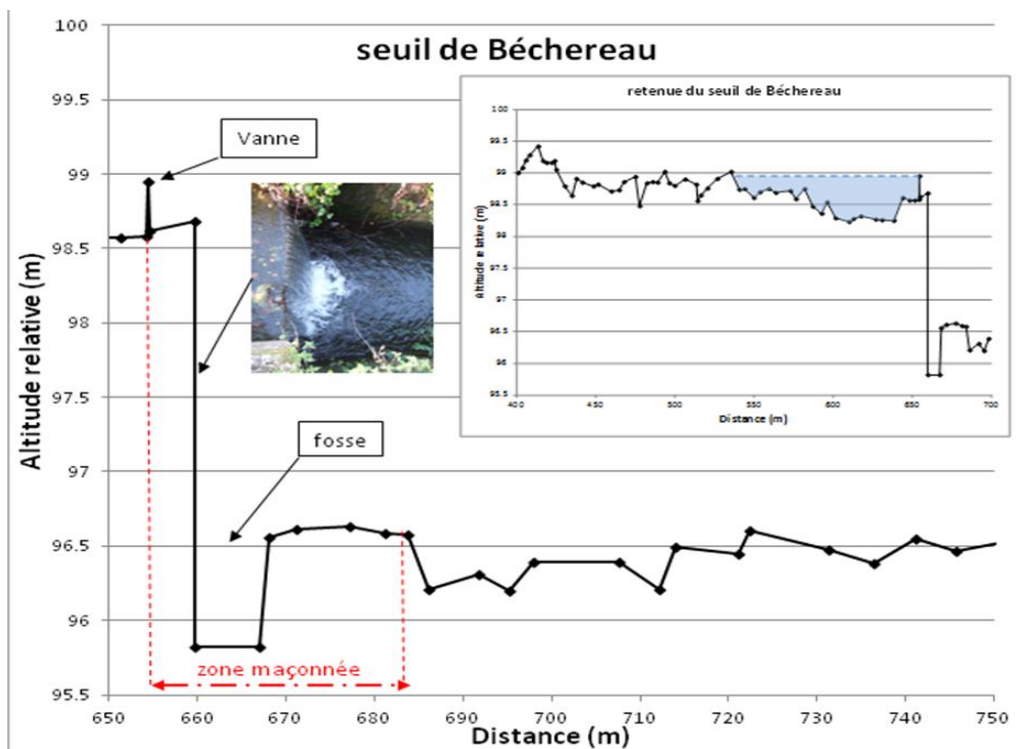


Figure 22 – Profil en long de l’Aulne, centré sur le seuil du Moulin de Béchereau.

Comme la plupart des ouvrages transversaux, le seuil bloque une fraction importante de la charge grossière de fond et accumule les sédiments fins dans la retenue. Lorsque le réservoir est plein, la pente est, pendant un certain temps au moins, plus faible que la pente initiale (Figure 22).

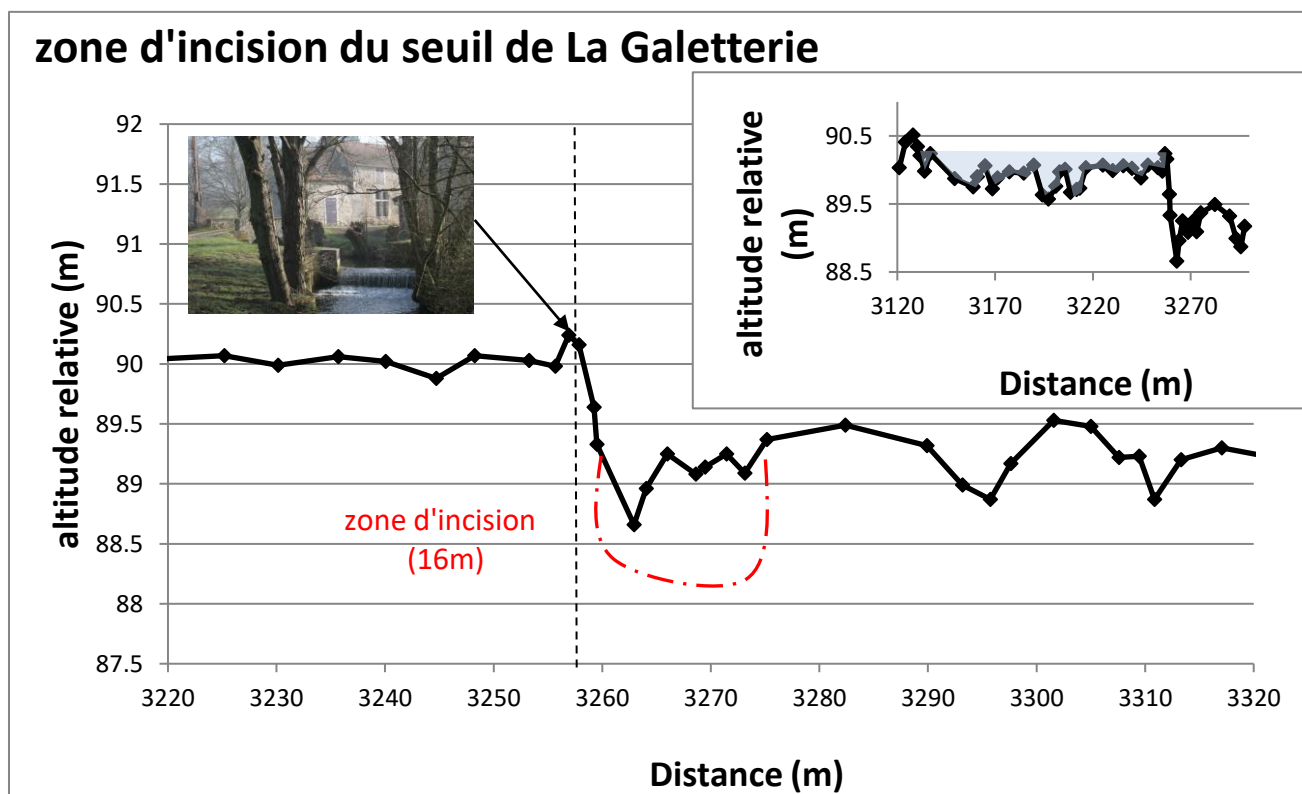


Figure 23 – Profil en long de l’Aulne, centré sur le seuil de La Galetterie.

Comme la plupart des ouvrages transversaux, le seuil bloque une fraction importante de la charge grossière de fond et accumule les sédiments fins dans la retenue. Lorsque le réservoir est plein, la pente est, pendant un certain temps au moins, plus faible que la pente initiale. On observe ce piégeage des sédiments lorsqu'on parcourt le fond du chenal. En amont direct des deux seuils, le lit de l'Aulne est, en effet, encombré par des dépôts d'éléments grossiers (au fond) et d'éléments plus fins (plus en surface). A l'aval du seuil de la Galetterie, on observe une zone d'incision (Figure 23).

3.2.2. Profil en long de la Mérantaise

Le profil en long couvre 2 100 m de linéaire. On y découvre un certain nombre d'éléments remarquables concernant la pente du lit mineur. En ce qui concerne la Mérantaise, la pente moyenne générale du lit du profil en long est de 0,75% (Figure 24).

Elle a été déterminée grâce à la courbe de tendance de la droite allant du premier au dernier point du profil en long. Pour ce type de cours d'eau – de plaine – la pente générale du lit est assez forte, en lien avec l'encaissement de la rivière dans le plateau de Trappes. Cependant, à une échelle plus fine, des variations marquées de la pente du lit mineur apparaissent : de 1% dans les zones d'incision à 0,01% dans les zones les plus planes.

Le profil en long fait apparaître des zones de surcreusement entre deux seuils à l'aval des obstacles. Le seuil d'Ors est l'obstacle le plus important dans ce secteur (1,30 m de chute). Ces phénomènes sont plus marqués pour la section à l'aval du seuil d'Ors (« fosses » 2, 3) et le surcreusement atteint 1,23 m par rapport au niveau attendu de la pente à l'aval du seuil (Figure 24).

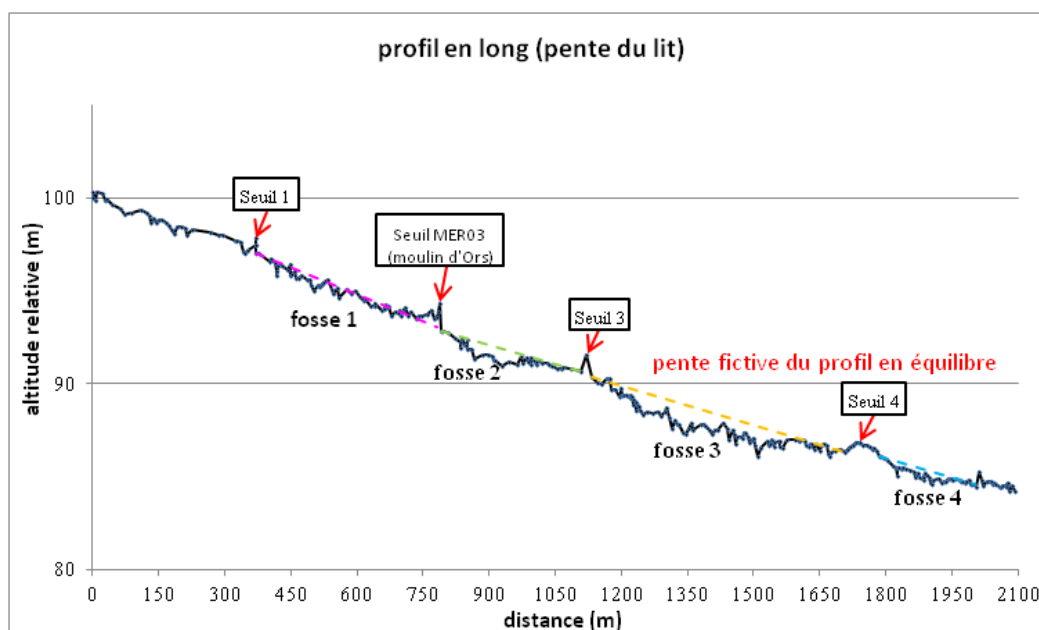


Figure 24 – Profil en long de la Mérantaise, présentant 4 zones de surcreusement.

Comme la plupart des ouvrages transversaux, le seuil bloque une fraction importante de la charge grossière de fond et accumule les sédiments fins dans la retenue. Lorsque le réservoir est plein, la pente est, pendant un certain temps au moins, plus faible que la pente initiale. On

date	heure	hauteur lue à l'échelle (cm)	jaugeage (m3/s)
26/04/2012	9h35	17.5	0.166
27/06/2012	9h10	10	0.045
17/12/2012	11h	23	0.228
21/12/2013	10h	45	1.19
29/01/2013	11h35	28	0.462

date	heure	hauteur lue à l'échelle (cm)	jaugeage (m3/s)
01/03/2012	15h25	17	0.060
26/04/2012	12h30	24	0.131
23/05/2012	15h30	34	0.250
20/06/2012	13h50	20	0.070
15/01/2013	10h30	50	0.392
06/02/2013	13h15	60	1.360

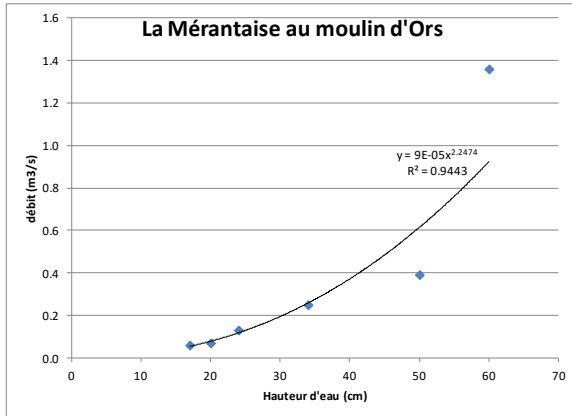
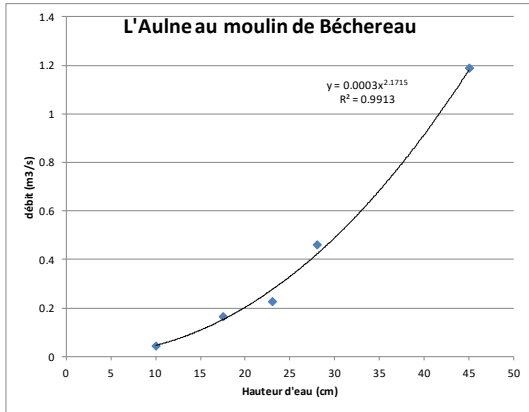


Figure 26– Calcul de la courbe de tarage.

Concernant l'Aulne, cette courbe de tarage présente un bon ajustement, elle est valable dans 99% des cas (pour des hauteurs d'eau situées entre 10 et 45 cm).

Sur la Mérantaise, l'ajustement est un peu moins bon, il est valable dans 94% des cas. L'ajustement est bon jusqu'à 34 cm de hauteur d'eau, la courbe de tarage est moins adaptée pour les hauteurs d'eau supérieures : ces valeurs sont donc à considérer avec précaution.

En novembre 2016, nous avons constaté le détamage de la station de mesure du pont de Béchereau qui, suite à la crue de mai 2016, s'est retrouvé dans une zone de retenue. Nous avons donc décidé de la déplacer plus en aval.



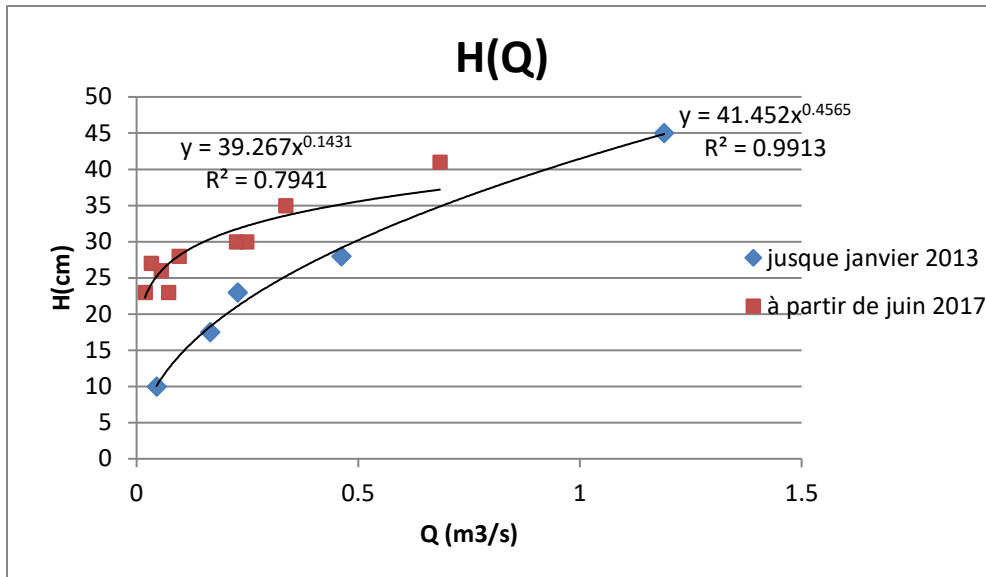
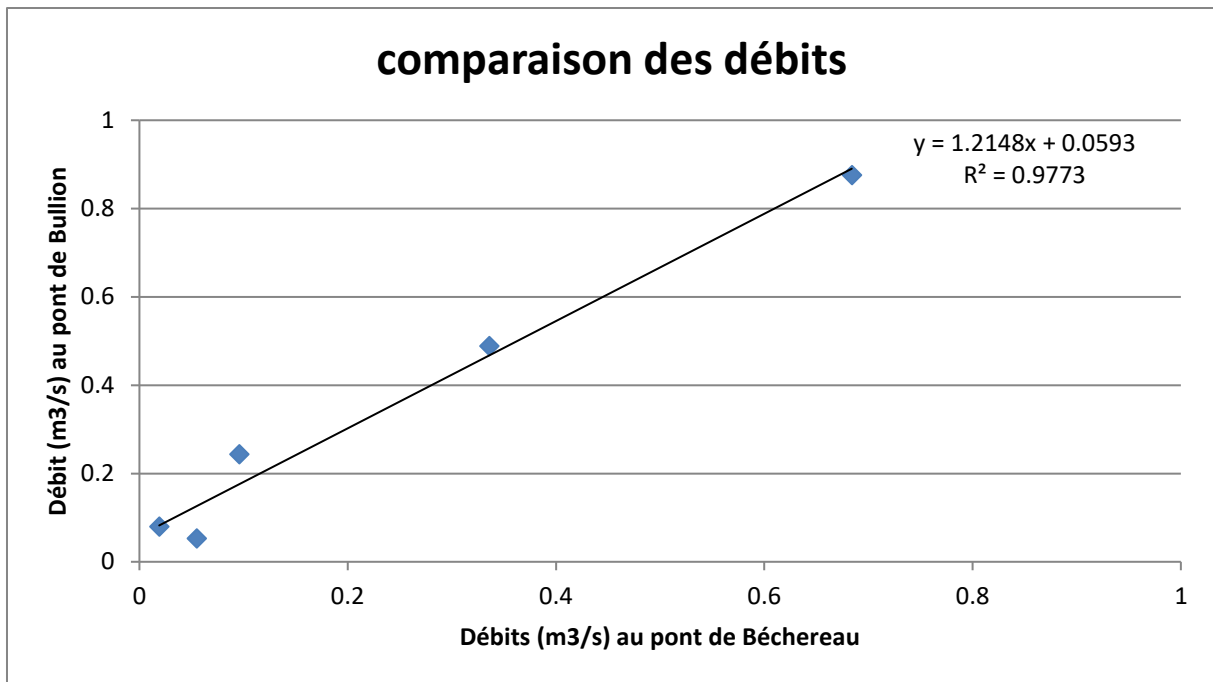


Figure 27– Calcul de la courbe de tarage.

La Figure 27 illustre cette situation où il n’y a pas eu de jaugeage entre janvier 2013 et juin 2017, ce qui explique que les courbes de tarage s’arrêtent en 2013 pour ne reprendre qu’en 2017.

Les points de jaugeage sont réalisés jusqu’en janvier 2013 pour la première courbe et celle-ci sert à calculer les débits jusqu’à la crue de juin 2016. La seconde courbe sert à calculer les débits depuis juin 2016. A partir de ces courbes de tarage, nous avons pu transformer les chroniques de hauteur d’eau en chroniques de débit.

Nous avons alors obtenu deux chroniques de mesures distinctes, l’une au pont de Béchereau de février 2012 à octobre 2017 et l’autre au pont de Bullion (rue Saint Vincent) de fin octobre 2017 au 4 janvier 2019. A l’aide des relevés ponctuels de hauteurs d’eau et de débits fait en simultané sur les deux sites d’octobre 2017 à avril 2018, nous avons pu estimer une chronique de données continue de février 2012 au 4 janvier 2019.



Les débits de Béchereau ont été recalés sur la chronique de Bullion. Pour cela seul le facteur multiplicateur a été retenu, la constante étant considérée comme négligeable.

L'incertitude étant plus élevée à mesure que l'on s'éloigne des hauteurs d'eau jaugées, elle sera donc plus grande au-delà de 1m³/s.

4.3. Suivi des débits

Les débits à plein bord positionnés sur les graphiques proviennent des valeurs calculées avec le logiciel Fluvia suite aux campagnes de mesures topographiques (cf. paragraphe 3.1.2 ci-dessus).

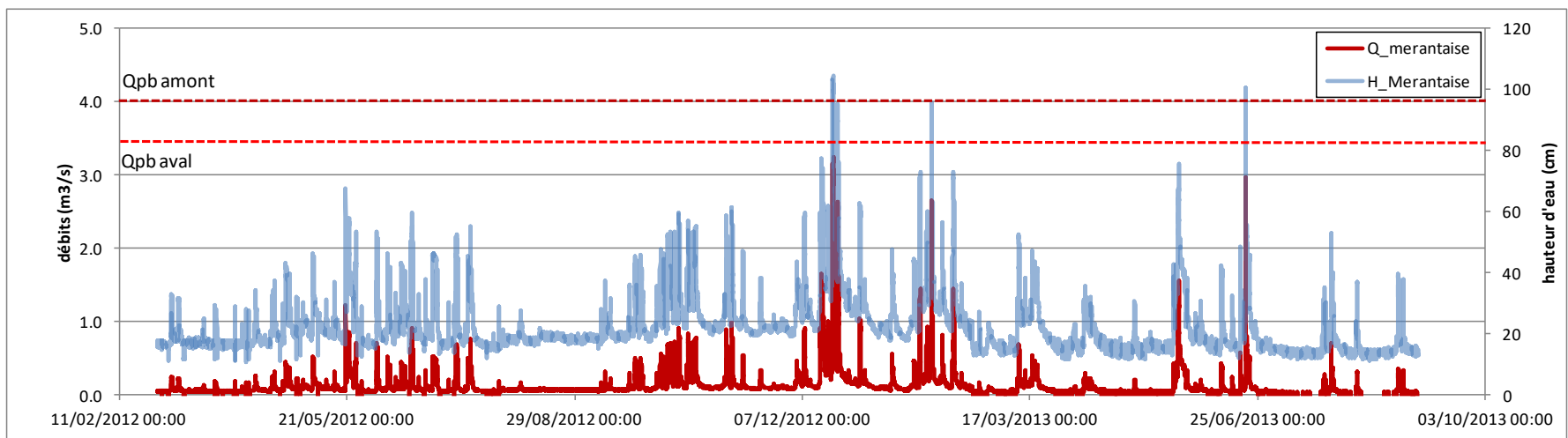
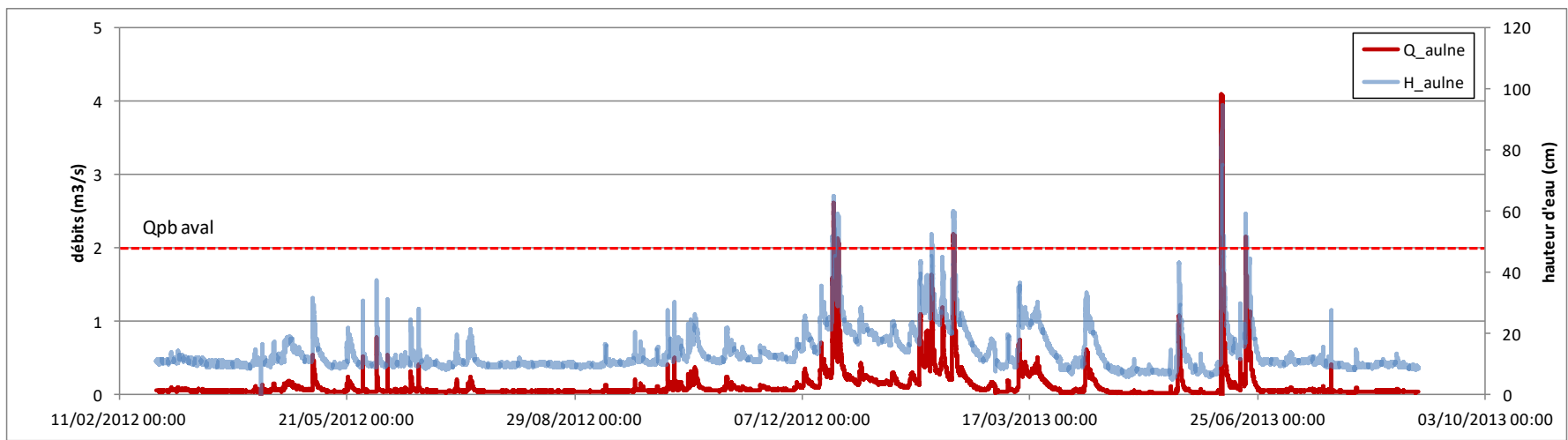


Figure 28 – Variation des hauteurs d'eau et des débits sur l'Aulne (pont de Béchereau) et la Mérantaise (passerelle du pré Bicheret).

Sur l'Aulne, seul le débit plein bord issu de la station topographique située en aval de l'obstacle est représenté car un affluent, le ruisseau de la Pierre du jeu, arrive entre la sonde de hauteur d'eau et la station topographique amont.

On peut voir que ce débit a été atteint à plusieurs reprises sur la période de l'étude (en décembre 2012, février et juin 2013) ; ce résultat est corroboré par les laisses de crues (dépôt de sable) observées sur les berges du cours d'eau à partir de la mi-décembre 2012 (Figure 29).



Figure 29 – Crue sur l'Aulne, le 21 décembre 2012. Vue de la chute du seuil de la Galetterie, dépôts de sable sur la berge juste en aval du seuil.

Concernant la Mérantaise, on peut voir que ces débits à plein bord sont différents selon que l'on se trouve à l'aval ou à l'amont de l'obstacle. Au seuil d'Ors, le débit à plein bord est plus important en amont de la chute qu'en aval. On peut également constater que ces débits à plein bord n'ont jamais été atteints sur cette période.

Le graphe des débits sur les deux cours d'eau (Figure 30) montre des amplitudes plus importantes sur la Mérantaise. Ceci peut s'expliquer en partie par la géologie et l'usage du sol du bassin versant. Le fond étant imperméable, il y a peu ou pas d'échange nappe/rivière et tout le débit transite de façon longitudinale. De plus, le bassin versant de la Mérantaise présente une urbanisation importante qui génère deux types de pressions augmentant le débit liquide: le rejet des eaux de l'agglomération de Saint-Quentin-en-Yvelines dans le ru Gironde, situé en confluence et en tête de bassin ; le ruissellement plus important des versants du fait de leur imperméabilisation (routes, parkings, ...). A l'inverse, l'Aulne est situé sur un substrat plus perméable où les échanges verticaux tamponnent l'effet des crues et restituent l'eau en période d'étiage. Le bassin versant est aussi beaucoup moins urbanisé, avec une tête de bassin très forestière.

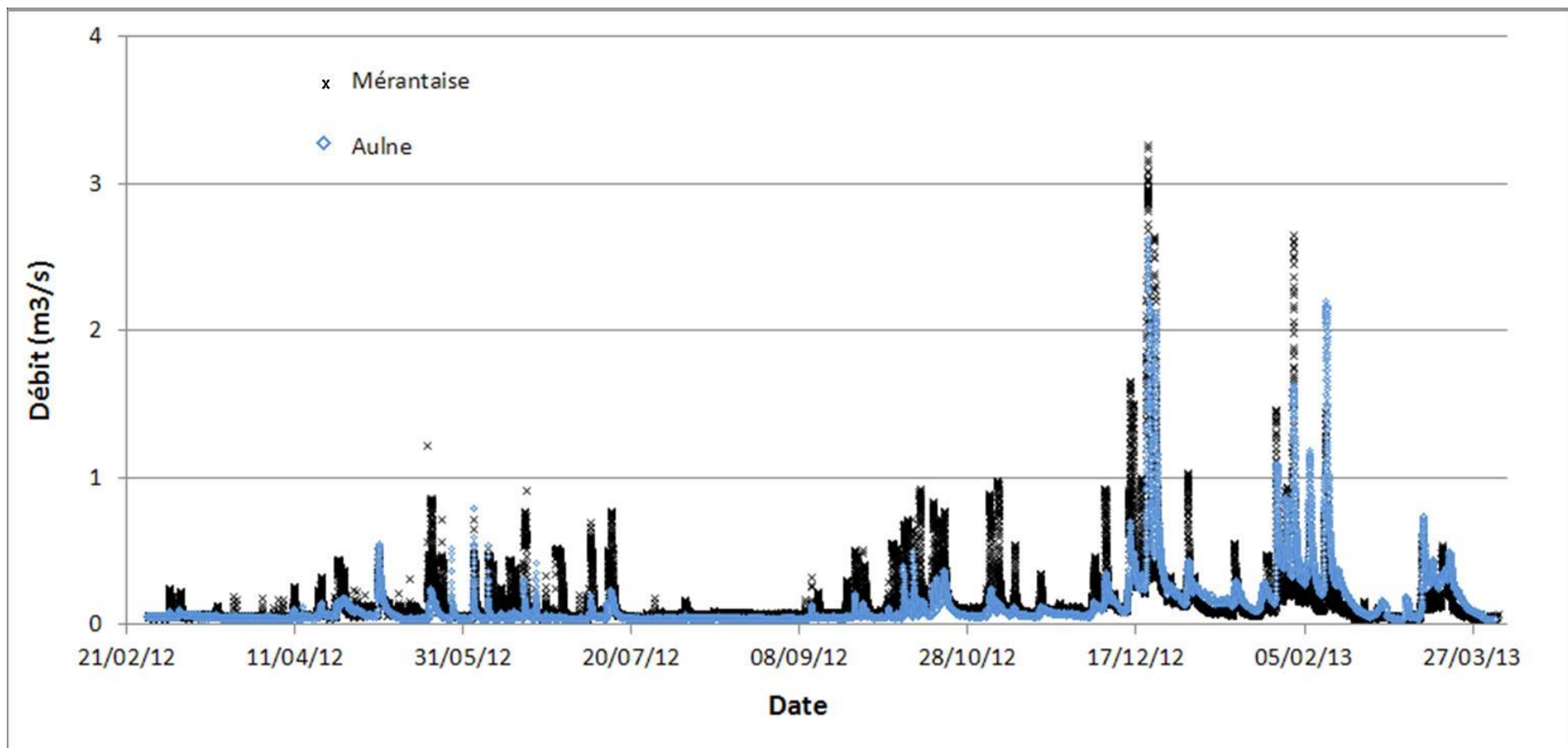


Figure 30 – Débits sur l'Aulne et la Mérantaise jusqu'en 2013.

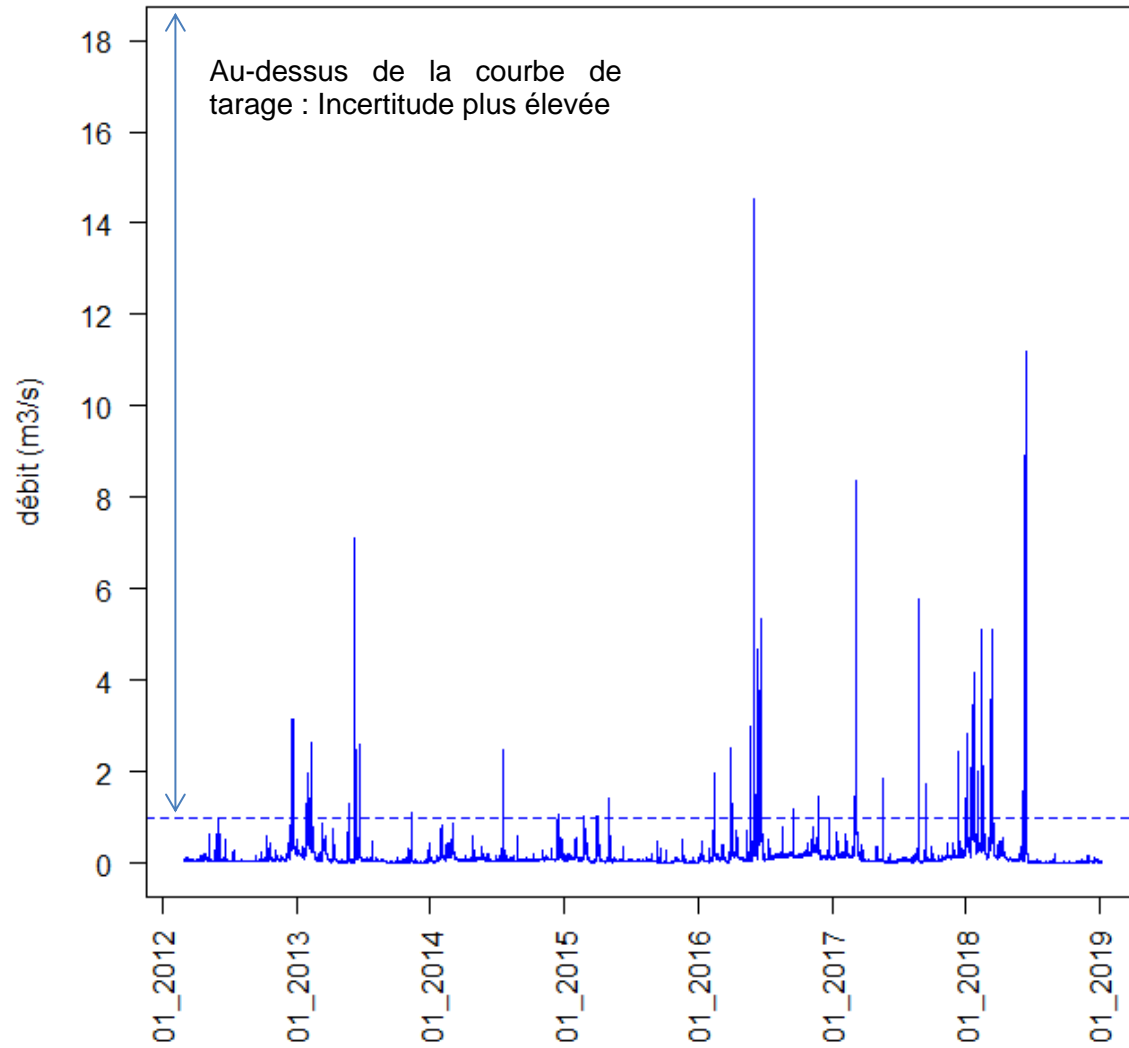


Figure 31 – Débits calculés à partir des hauteurs d'eau sur l'Aulne de 2012 à 2019

	débit (m ³ .s ⁻¹)
Min.	0,005
1er quartile	0,047
Médiane	0,070
Moyenne	0,159
3eme quartile	0,145
Max.	14,541

Ces résultats montrent des débits moyens de 0,159 m³.s⁻¹). Cependant plusieurs pics de crue ponctuels dépassant les débits plein bord calculés aux stations topographiques sont visibles. On peut noter notamment des crues importantes en juin 2013, juin 2016, mars 2017 et juin 2018 (Figure 32).

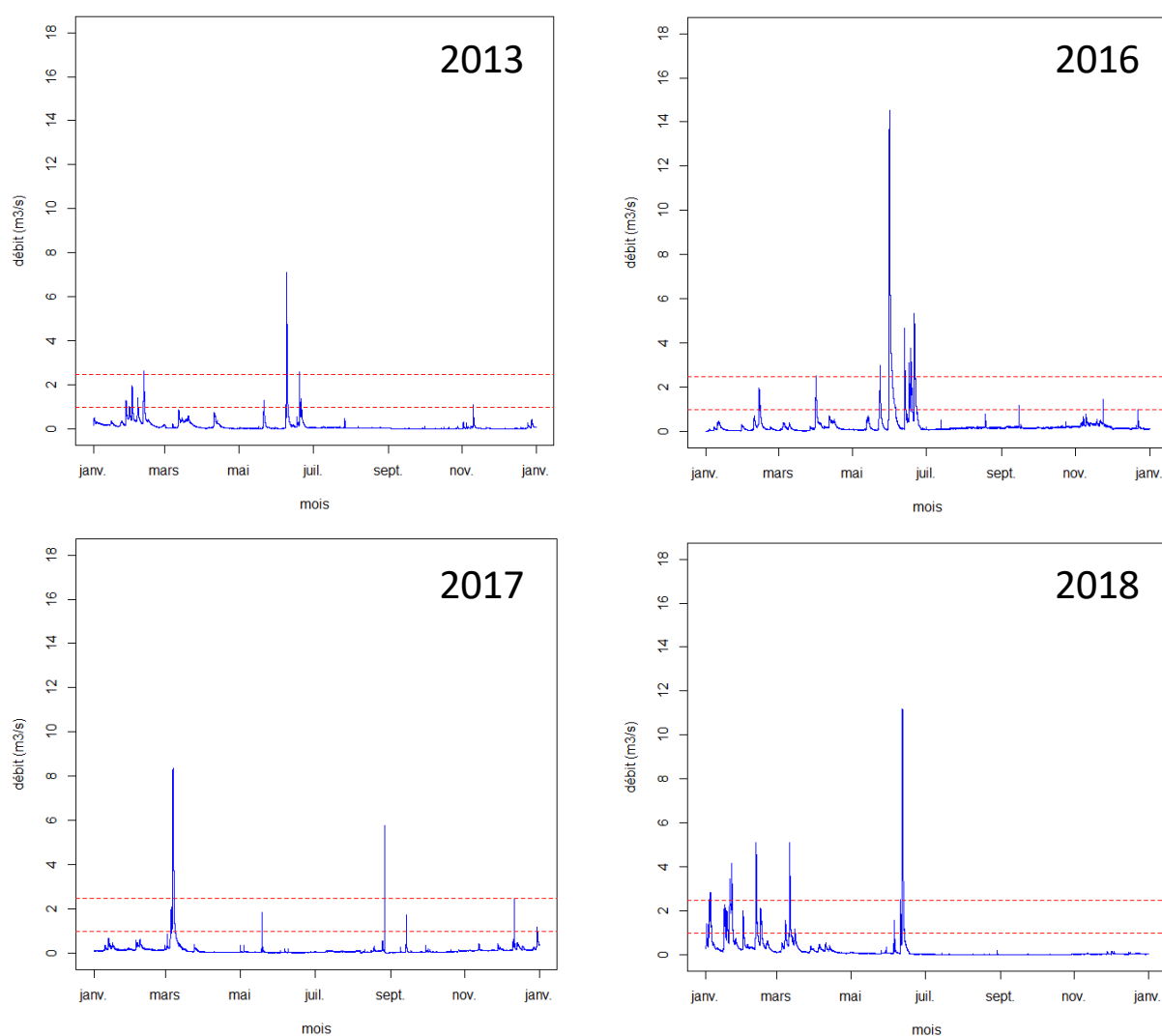


Figure 32 – Débits calculés sur l’Aulne, les débits à plein bord sont figurés en pointillés rouge (1m³.s⁻¹ à la station amont et 2,5 m³.s⁻¹ à la station aval).

4.4. Courbe des débits classés

La courbe des débits classés permet d'observer la fréquence de non dépassement des débits au cours du temps. Ces courbes sont à considérer pour le temps de l'étude. La période de données étant restreinte, il n'est pas possible d'évaluer les périodes de retour des débits.

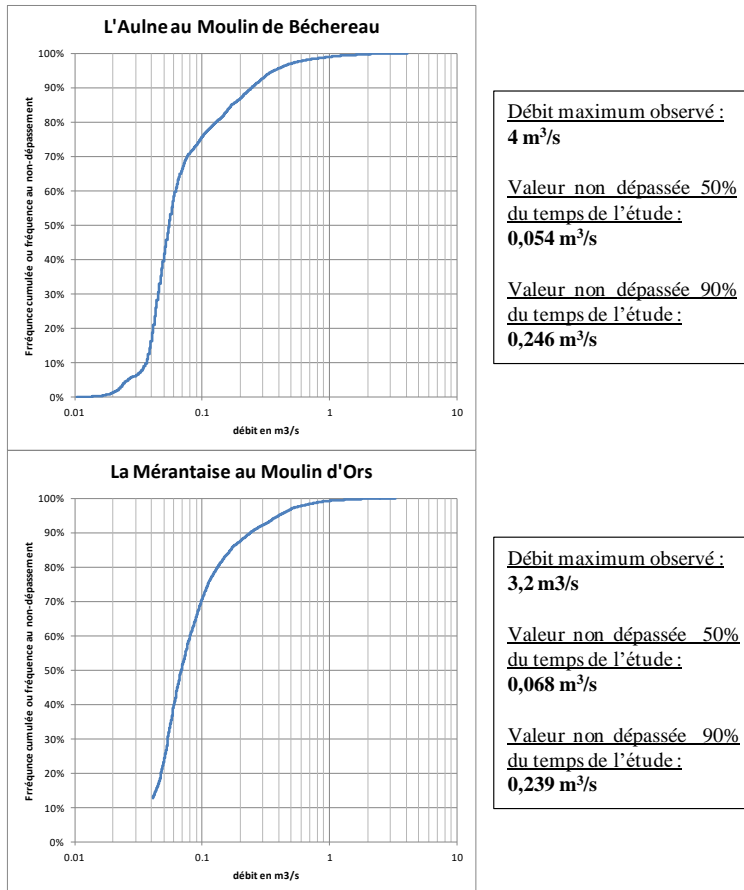


Figure 33 – Courbes des débits classés de l'Aulne au moulin de Béchereau et de la Mérantaise au Moulin d'Ors.

On peut remarquer que le débit de l'Aulne est assez faible la plupart du temps de l'étude avec quelques valeurs élevées atteintes exceptionnellement et qui dépassent le débit à plein bord. Les incertitudes de mesure étant trop grandes pour les faibles hauteurs d'eau sur la berge juste en dessous de 15 cm de hauteur d'eau soit pour les débits inférieurs à 0,041 m³/s, ce qui s'est produit 12,6% du temps sur la période de l'étude. On remarque également un débit assez faible sur la Mérantaise sur le temps de l'étude avec quelques valeurs élevées exceptionnelles.

5. Identification des faciès d'écoulement, des abris et de la ripisylve

Les faciès d'écoulement sont de petites portions de cours d'eau (d'une longueur comprise entre 1 et 10 fois la largeur à plein bord environ) présentant une homogénéité, à l'échelle de quelques m² à quelques centaines de m², sur le plan des vitesses, des profondeurs, de la granulométrie, de la pente du lit et de la ligne d'eau, des profils en travers. Ils sont le reflet à long terme des contraintes exercées par la géologie, la morphologie terrestre, la couverture

végétale et le climat. La diversité des faciès est mise à profit par la flore et la faune aquatique qui y rencontrent les différents habitats nécessaires à l'accomplissement de leurs cycles vitaux. La typologie utilisée est celle mise en place par Malavoi et Souchon en 2002. Elle permet d'identifier potentiellement 11 faciès différents (Annexe 2). L'inventaire des faciès réalisé par le PNR en 2011 couvre l'ensemble des deux cours d'eau. Un inventaire a été fait par l'IRSTEA en 2012 sur le secteur des deux cours d'eau qui est suivi par télémétrie, notamment pour compléter les inventaires sur la Mérantaise en aval de l'ouvrage MER01. Cet inventaire est borné en amont par les deux seuils étudiés.

5.1. Faciès inventoriés sur l'Aulne

Les faciès inventoriés sur l'aulne par le PNR HVC (Figure 34) permettent d'identifier 4 zones principales où l'habitat semble peu diversifié (seulement un ou deux faciès sur un linéaire important):

- à l'amont du village Les Bordes : prédominance de plat lent (93%)
- à l'amont du seuil du moulin de Béchereau (AUL 25) : sur 1080 mètres, 900 mètres sont des plats courants (soit 83%) et 130 m des radiers, soit 12%.
- la zone amont et aval de la Picardie (AUL 23) : sur ces 1930 m de cours d'eau, 97% des faciès inventoriés sont lenticques.
- à l'aval de l'autoroute A10 : 490 m de faciès lents.

Excepté à l'amont immédiat du seuil du moulin de Béchereau, les zones de faible diversité d'habitat sont généralement dominées par les faciès lents. Une analyse centrée sur le seuil du moulin de Béchereau (AUL 25) permet de caractériser plus finement les faciès retrouvés en amont et en aval du seuil (Figure 35). L'amont du moulin de Béchereau est dominé par des plats courants. Des radiers apparaissent seulement au-delà de 400 m à l'amont du seuil.

La distribution de faciès retrouvée à l'amont n'est pas caractéristique des zones amont de seuil qui sont souvent dominées par des plats lenticques, ce qui donne un effet retenue. Ceci pourrait s'expliquer par l'ancienneté de la création du bief perché. Une érosion du fond du lit a du s'opérer au fil du temps permettant ainsi une augmentation de la pente du cours d'eau et le passage d'un faciès "lenticque" à un faciès "courant". Les photos historiques viennent appuyer cette hypothèse. La Figure 3 montre bien qu'au début du XXème siècle l'amont immédiat du seuil était plus large et les faciès plus lents qu'actuellement.

L'aval du seuil quant à lui présente majoritairement des plats lenticques. Il semble plus diversifié avec une alternance de radier/plat assez importante.

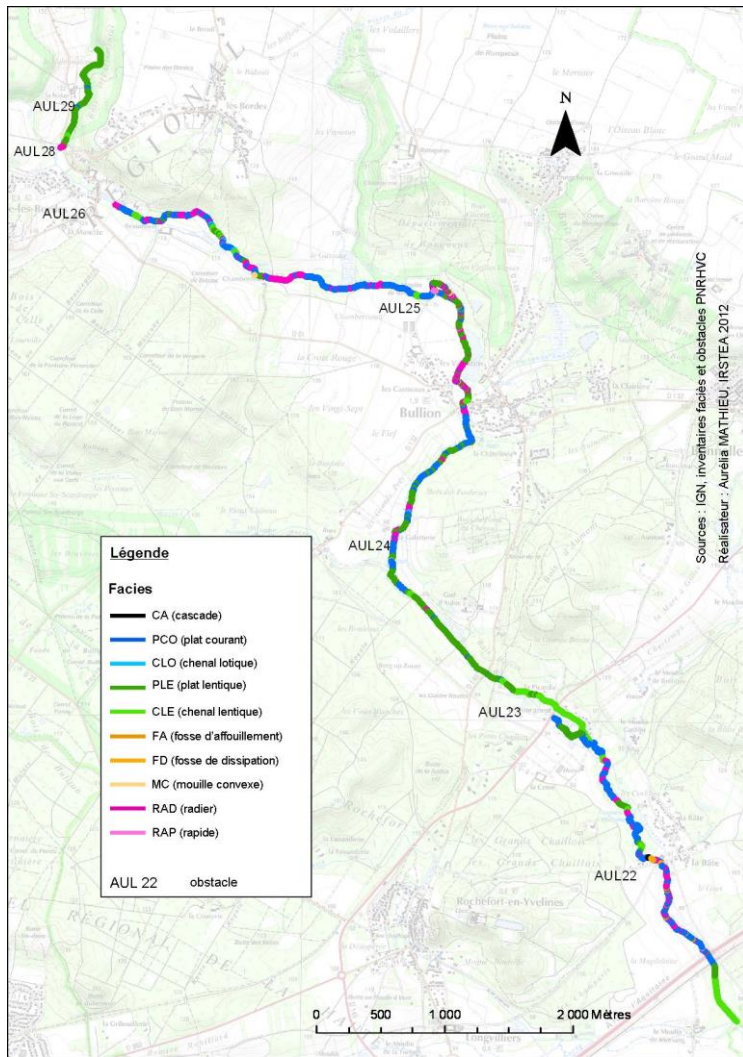


Figure 34 – Inventaire des faciès sur l'Aulne.

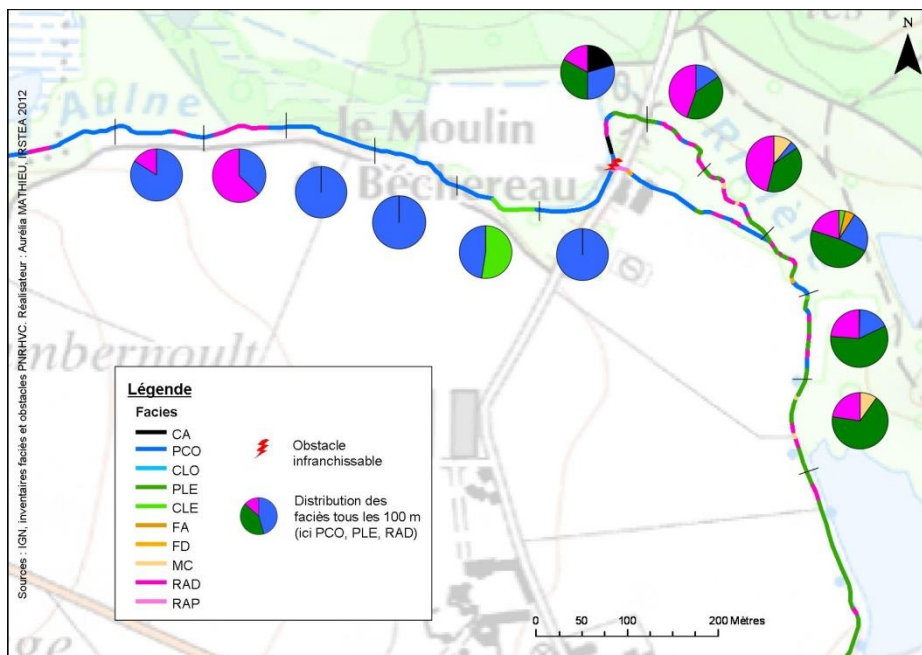


Figure 35 – Distribution tous les 100 mètres des différents faciès à l'amont et à l'aval du moulin de Béchereau. Code des faciès sur la Figure 34.

Ces distributions de faciès aux abords du seuil ont ensuite été comparées aux distributions retrouvées sur l'ensemble du linéaire inventorié par le PNR (Tableau 4).

Tableau 4 – Proportion des faciès retrouvés à l'amont et l'aval immédiat du seuil de Béchereau par rapport à ceux retrouvés sur l'ensemble du linéaire inventorié. Code des faciès sur la Figure 34.

Faciès	% sur les 12 570 m inventoriés	% sur les 600m à l'amont de Béchereau	% sur les 600 m à l'aval de Béchereau
PLE	30,9		47,2
CLE	13,2	7,8	0,6
PCO	36,8	80,4	14,2
CLO	0,5		
RAD	16,5	11,8	30,5
RAP	0,2		
FA	0,4		
FD	0,5		0,9
MC	0,5		3,3
CA	0,4		3,3

Le linéaire total étudié présente 10 faciès différents, les 600 mètres amont du seuil de Béchereau seulement 3 et les 600 mètres aval 7 faciès. Par rapport au linéaire total, l'amont du seuil est marqué par une forte proportion de plats courants, une très faible proportion de faciès lenticulaires (PLE et CLE) et de radiers. L'aval quant à lui se démarque par son pourcentage élevé en plats lents, radiers, mouille convexe et cascade (chute du moulin de Béchereau). En revanche, les plats courants sont moins abondants que sur le linéaire total.

5.2. Faciès inventoriés sur la Mérantaise

La cartographie des faciès (Figure 36) permet d'isoler deux zones principales où dominent seulement un ou deux faciès. La première s'étend de l'ouvrage MER 12 jusqu'à l'amont de l'inventaire ; ce linéaire de 4 km est essentiellement composé de plats courants (54%) et plats lents (38%).

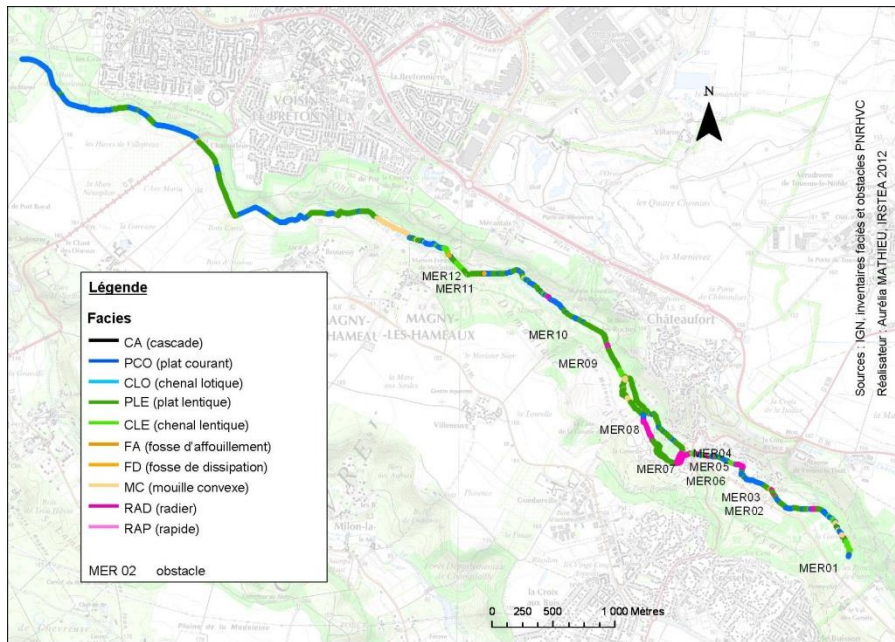


Figure 36 – Inventaire des faciès sur la Mérantaise

La deuxième zone se situe entre les obstacles MER 07 et MER 10. Sur une distance hydrographique de 1,5 km, on note une prédominance des faciès lents (89%).

L'étude plus fine de l'amont et l'aval du seuil du moulin d'Ors révèle des profils semblables à l'amont et à l'aval (Figure 37). Les 100 premiers mètres sont plus diversifiés, entre 100 mètres et 300 mètres à l'amont et à l'aval du seuil on observe seulement des plats courants et lentiques. La diversité des faciès est de nouveau observable 300 mètres à l'amont du seuil et 400 mètres à l'aval.

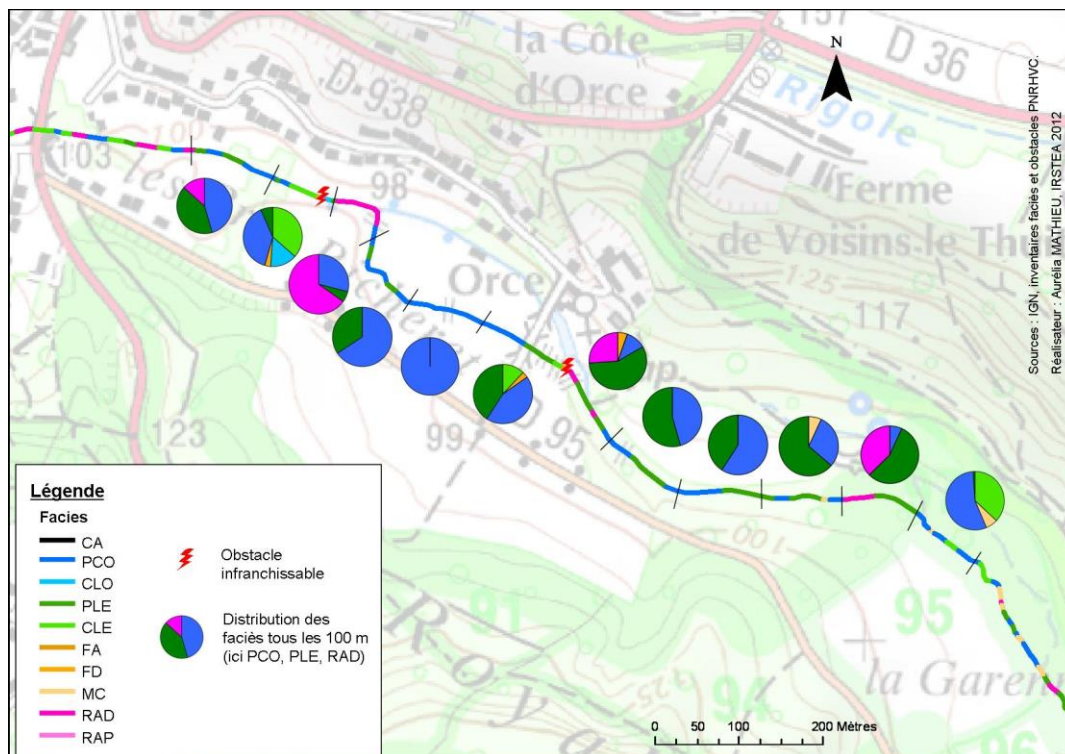


Figure 37 – Distribution tous les 100 mètres des différents faciès à l'amont et à l'aval du moulin d'Ors. Code des faciès sur la Figure 34.

Ces distributions de faciès ont ensuite été comparées aux distributions retrouvées sur l'ensemble du linéaire inventorié par le PNR (Tableau 5).

Tableau 5 – Proportion des faciès retrouvés à l'amont et l'aval immédiat du seuil par rapport à ceux retrouvés sur l'ensemble du linéaire inventorié. Code des faciès sur la Figure 34.

Faciès	% sur les 10220m inventoriés	% sur les 600m à l'amont d'Ors	% sur les 600m à l'aval d'Ors
PLE	45,7	20,8	43,9
CLE	6,2	10,7	7,6
PCO	35,6	52,9	35,8
CLO	0,1	2,4	
RAD	7,1	12,7	10,2
FD	0,4	0,5	
MC	4,7		2,5
CA	0,2		

Sur les 8 faciès retrouvés sur l'ensemble du linéaire, 6 sont présents sur les 600 m à l'amont du seuil et 5 sur les 600 m à l'aval du seuil (Tableau 5). Par rapport aux faciès retrouvés sur l'ensemble du linéaire, l'amont du seuil présente un pourcentage de plat lent plus faible et un pourcentage de plat courant plus fort. Il est à noter également l'absence de mouille sur ce secteur alors que ce faciès représente 4,7% sur l'ensemble du linéaire. L'aval du seuil d'Ors se démarque par un pourcentage élevé en radier et un faible pourcentage en mouille convexe.

5.3. Faciès inventoriés sur les secteurs d'études « télémétrie »

Les cartes des faciès inventoriés par IRSTEA sur les secteurs suivis par télémétrie ont été utilisées pour réaliser une analyse de l'hétérogénéité locale à l'aide d'une méthode d'analyse cartographique en fenêtre glissante, implémentée à l'aide du logiciel Chloe 2012 (nouvelle ref). L'analyse d'image en fenêtre glissante consiste à affecter aux pixels d'une carte la valeur d'un calcul réalisé dans une fenêtre carrée/ronde/fonctionnelle centrée sur chacun de ces pixels. La carte des faciès inventoriés sur l'Aulne est présentée Figure 39. Elle a été réalisée pour une taille de fenêtre fonctionnelle de 11 m, c'est à dire qui prend en compte le tracé du cours d'eau. Pour chaque pixel, le calcul se fait 11m vers l'amont et vers l'aval et latéralement. Un exemple de cette analyse pour la Mérantaise est présenté Figure 38, elle révèle les secteurs où la diversité locale des faciès (22 m) est forte (valeurs élevées d'hétérogénéité) et ceux qui sont homogènes.

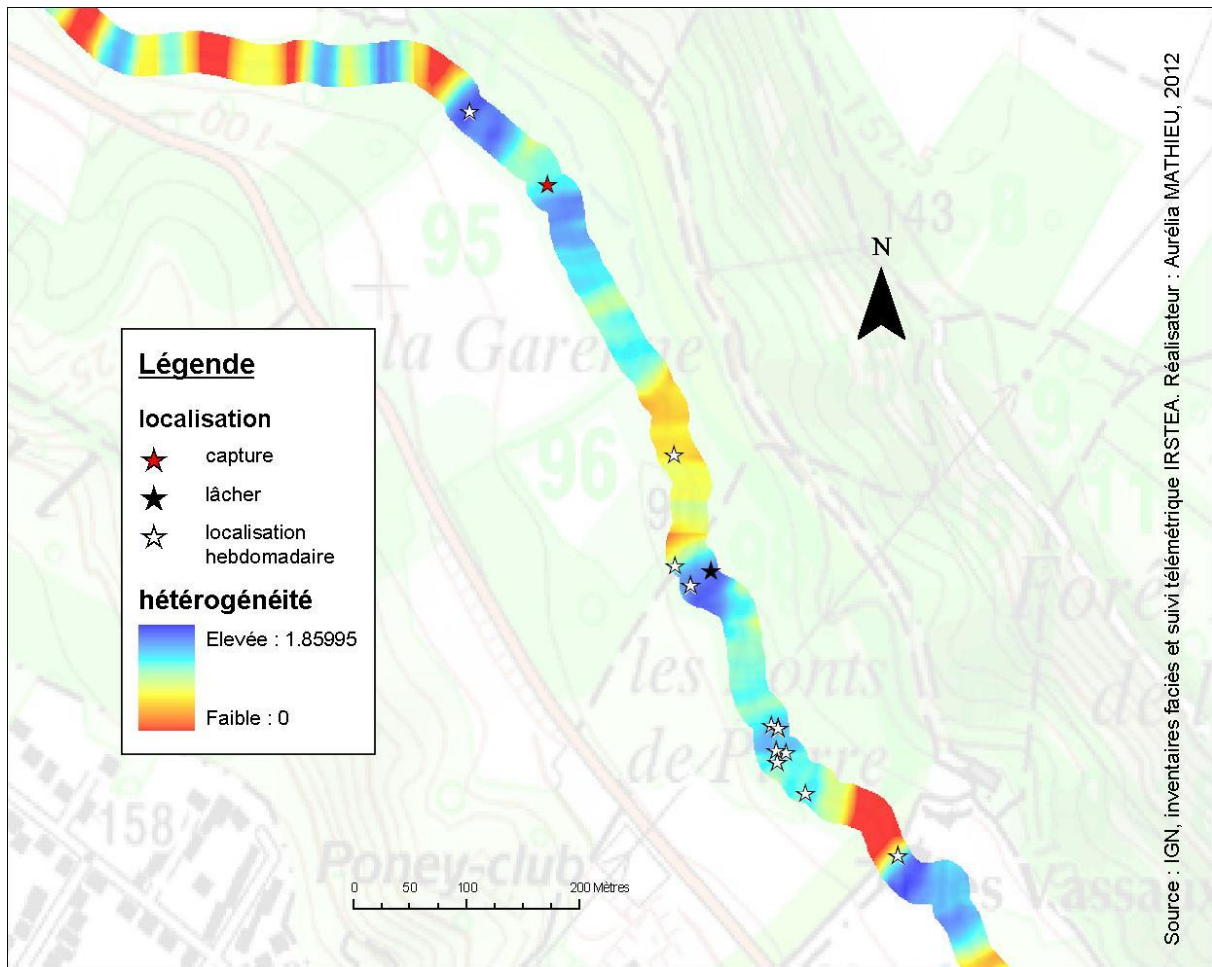


Figure 38 – Carte d'hétérogénéité de l'habitat (logiciel Chloé 2012) sur la Mérantaise et localisation de la truite 23 du 3 avril au 31 août. (Pour des questions de visualisation, le cours d'eau a été grossi 8 fois)

5.4. Les abris

L'identification des abris a été réalisée en août 2012 pour l'Aulne (Vaultier, 2012), à l'hiver 2013 pour la Mérantaise en aval du seuil d'Ors et à l'hiver 2014 pour l'amont du seuil d'Ors. Les catégories suivantes ont été géolocalisées individuellement à l'aide d'un GPS lorsqu'elles étaient suffisantes pour constituer des abris: sous-berge, embâcle, racines, branchage, blocs et végétation aquatique. La Figure 39 illustre la distribution spatiale sur l'Aulne.

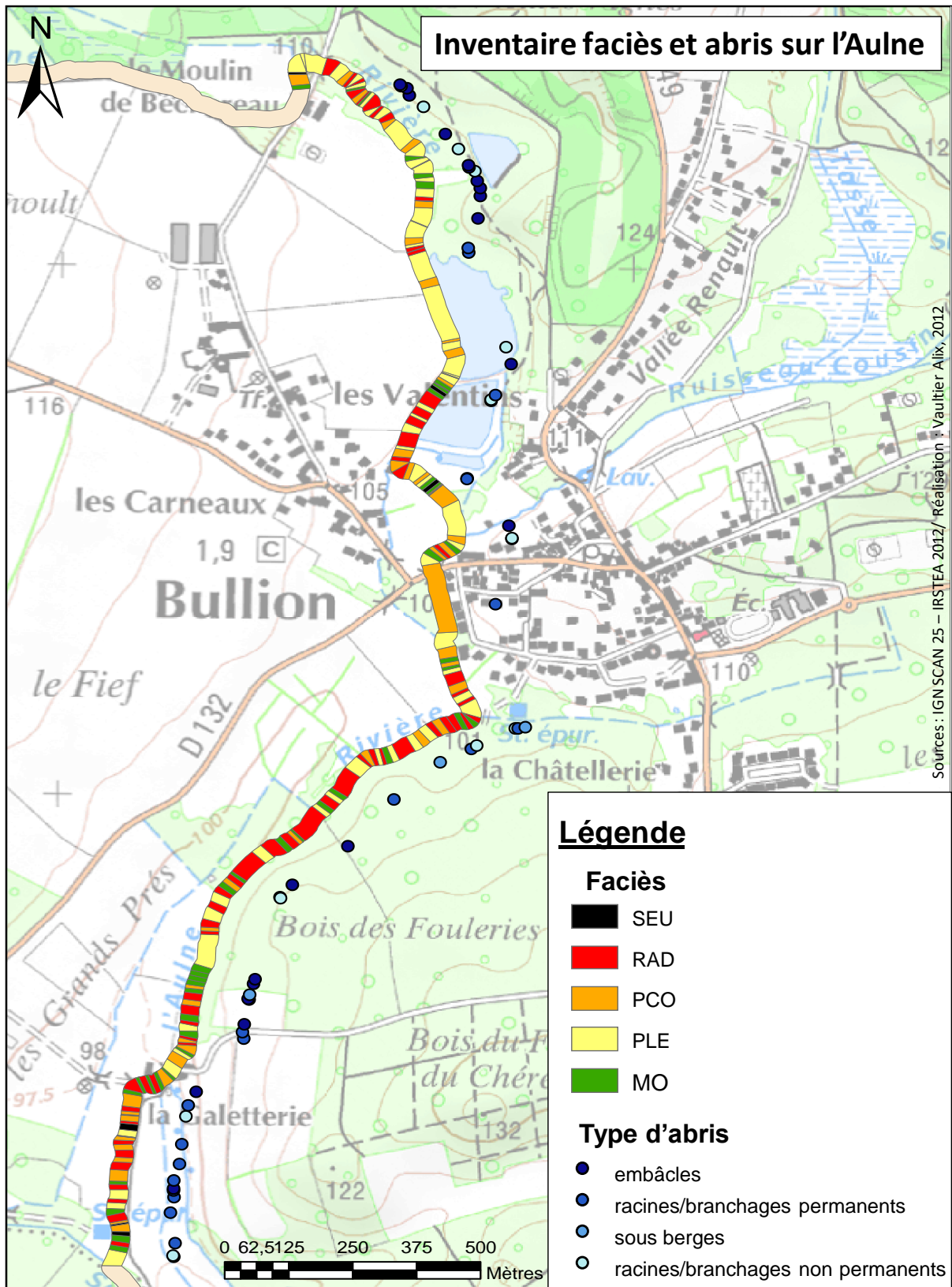


Figure 39 – Carte des faciès et des abris sur le secteur d'étude « télémétrie » de l'Aulne (Vautier 2012).

6. Suivi avant restauration des communautés de macroinvertébrés

6.1. Etat des lieux de la qualité physico-chimique de l'Aulne (rapport Hydrosphère données 2012)

L'Aulne est un petit cours d'eau dont les températures sont fraîches, avec $\approx 17^{\circ}\text{C}$ l'été et $\approx 6^{\circ}\text{C}$ l'hiver (Tableau 6), 17°C semble un optimum en été pour que les truites s'alimentent ($7-22^{\circ}\text{C}$). L'oxygène dissous est à 9 mg/l en période estivale, ce qui est favorable à cette espèce très exigeante dont les besoins sont autour de 7 à 11 mg/l . Le taux de saturation est ici compris entre 74 et 97% ; il est considéré excellent pour les poissons d'eau courante entre 80 et 125% . Les valeurs de conductivités sont relativement faibles et stables : de 245 à $366\ \mu\text{S/cm}$ et les valeurs de pH sont comprises entre $7,62$ et $7,91$.

L'Aulne à la Galetterie présente d'une manière générale des eaux en « bon » à « très bon » état physico-chimique. Elles se dégradent en « moyen » voire « mauvais » état dès que les précipitations pluvieuses augmentent significativement la charge en MES et véhiculent des intrants agricoles qui accroissent la concentration en ammonium. Le bassin versant, à la fois urbain et agricole est propice à ce genre de phénomène. Il est à noter que les débits observés lors de ces campagnes de mesures (jaugeage au débitmètre) sont assez proches de ceux calculés à partir des données continues de hauteur d'eau (sonde de pression, installée au pont du moulin de Béchereau), et d'une courbe de tarage établie par jaugeages (§ 4.2).

Tableau 6 – Données physico-chimiques sur l'Aulne à La Galetterie (D'après Hydrosphère, 2012).

Rivière		Aulne						A2
Communes		A2						
Dept		Bullion						
Date		30/05/12	26/07/12	27/09/12	27/11/12	30/01/13	26/03/13	Etat général par altération
Heure		9h15	14h00	12h00	13h45	12h00	12h30	
T air (°C)		18,00	30,00	12,00	6,00	11,00	6,00	206,75
Météo		Ciel bleu	Ciel bleu	couvert	Couvert et venteux	Pluie	Couvert	
Débit (l/s)		76,3	34,31	42,28	81,001	859	147,58	Mauvais
Particules en suspension	MES (mg/l) (2)	39,00	22,00	39,00	10,00	110,00	12,00	Très bon
	Température	Température (°C)	13,9	17	12,5	8,3	7,4	6,4
Acidification	pH	7,85	7,62	7,90	7,85	7,78	7,91	Très bon
	Salinité	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)(2)	348,00	366,40	330,80	328,60	249,00	245,00
SO4 (2)		-	-	-	-	-	-	
Cl- (2)		-	-	-	-	-	-	
Bilan de l'oxygène	O2 saturation (%)	73,60	93,30	86,60	96,60	87,50	93,00	Bon
	O2 dissous (mg/l)	7,60	9,00	9,23	11,27	10,48	11,46	
	COD (mg/l)	5,80	3,50	5,70	4,80	6,40	6,20	
	DBO5 (mg/l)	<3	<3	<3	<3	<3	<3	
Nutriments	Ammonium NH4+ (mg/l)	0,90	<0,5	<0,5	1,80	0,60	<0,5	Moyen
	Nitrites (mg/l)	0,08	0,06	0,02	0,02	0,02	0,017	
	Nitrates NO3- (mg/l)	2,10	3,30	2,30	2,50	4,90	2,90	
	Phosphates PO4- (mg/l)	0,30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	
	Phosphore total (mgP/l)	0,10	0,10	0,10	<0,1	0,20	<0,1	

(2) Aucun seuil n'est fixé par la DCE, utilisation des seuils fixés par le SEQ-Eau V2

NA : Non analysé ou non répondu

6.2. Calcul des indices IBG-DCE

Dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), l'IBG DCE (indice temporaire) a été établi pour évaluer la qualité biologique globale des masses d'eau. Il est intégrateur de la qualité des habitats et de la qualité de l'eau.

Les macro-invertébrés benthiques sur l'Aulne et la Mérantaise ont donc été échantillonnés selon le protocole mis en place pour le réseau de contrôle et de surveillance (RCS) (Norme XP T 90-333, AFNOR, 2009). Il a l'avantage de pouvoir à la fois (i) estimer l'aptitude du milieu à héberger des macro-invertébrés et (ii) être représentatif des habitats les plus présents.

Les 4 stations, définies pour réaliser les mesures hydromorphologiques, sont utilisées comme stations de prélèvement des invertébrés. Deux campagnes de prélèvement ont eu lieu : une les 6-7 juin 2011 et une autre les 4-5 juin 2013.

Les macro-invertébrés sont échantillonnés à l'aide d'un filet de type Surber (0,5 mm de vide de maille, surface échantillonnée : 1/20 de m²), 8 prélèvements sont réalisés sur les substrats dominants (*i.e.* substrats dont la surface de recouvrement estimée est supérieure à 5 % de la surface totale de la station) et 4 sur les substrats marginaux (*i.e.* substrats dont la surface de recouvrement estimée est inférieure ou égale à 5 % de la surface totale de la station).

Ces douze prélèvements sont répartis selon trois phases d'échantillonnage de 4 prélèvements. La première phase consiste à échantillonner 4 habitats marginaux suivant l'ordre décroissant de leur habitabilité (informations fournies par le protocole, cf Tableau 7). Les 2^{ème} et 3^{ème} phases consistent à échantillonner les habitats dominants. Les prélèvements de la phase 2 sont effectués selon leur habitabilité et ceux de la phase 3, en privilégiant la représentativité des substrats présents.

Tableau 7 – Types de substrats potentiellement présents associés à leur ordre d'habitabilité (classés par ordre décroissant) et leur mode d'échantillonnage.

Substrats	Habitabilité	Mode de prélèvement
Bryophytes	11	Végétal seul (sur bloc) ou avec élément support (sur cailloux)
Spermaphytes immergées (hydrophytes)	10	Inclut la couche superficielle du sédiment
Débris organiques grossiers (litière)	9	Inclut la couche superficielle du sédiment
Chevelus racinaires, supports ligneux	8	Végétal seul
Sédiments minéraux de grande taille (pierres, galets) (25 à 250 mm)	7	Inclut les différentes classes granulométriques de sédiments
Blocs (>250 mm) inclus dans une matrice d'éléments minéraux de grande taille (25 à 250 mm)	6	Inclut les sédiments et la faune associés au bloc (abris sous bloc)
Granulats grossiers (graviers) (2 à 25 mm)	5	Inclut les différentes classes granulométriques de sédiments
Spermaphytes émergents de strate basse (hélrophytes)	4	Inclut la couche superficielle du sédiment
Vases : sédiments fins (<0,1 mm) avec débris organiques fins	3	Couche superficielle du sédiment (<3 cm)
Sables et limons (<2 mm)	2	Couche superficielle du sédiment (<3 cm)

Algues	1	Inclut les éléments minéraux du support
Surfaces uniformes dures naturelles et artificielles (roches, dalles, marnes et argiles compactes)	0	Raclage de surface

Chaque prélèvement est stocké indépendamment. Les échantillons sont conservés dans du formaldéhyde à 4 % de concentration finale. Chaque échantillon est rincé à l'eau au moyen d'une colonne de trois tamis (2,5 mm ; 1,25 mm ; 0,5 mm), sous hotte aspirante. Le tri et l'identification sont réalisés dans de l'eau, sous loupe binoculaire (Leica MZ 125). Les individus récoltés sont identifiés selon les critères fournis par la circulaire DE/MAGE/BEMA 07/n°4 (2007), c'est à dire au genre à l'exception des Diptères (famille) et des Oligochètes (classe). Les listes faunistiques des stations, échantillonnées en 2011, sont présentées en Annexe 3.

Pour chacun des sites, les listes faunistiques permettent, sur la base de la grille de calcul de l'IBGN (AFNOR T90-350), de déterminer (i) le groupe indicateur (GI) qui correspond à la polluo-sensibilité des familles indicatrices et (ii) le nombre de taxons (NT) qui informe sur la diversité des habitats. Une richesse taxonomique élevée est habituellement indicatrice de la bonne santé d'un cours d'eau. Le nombre de taxons avec un nombre d'individus > 2 a été calculé afin de voir la part des taxons rares. Le pourcentage d'individus appartenant aux Epheméroptères, Plécoptères et Trichoptères (EPT) est un indicateur de la qualité du milieu, car ces trois ordres sont généralement considérés comme les plus sensibles à la pollution et aux perturbations. Une proportion élevée de Chironomidae ou d'Oligochaeta, des taxons considérés comme tolérants aux perturbations est généralement un signe d'altérations du milieu.

Tableau 8 – Résultats des calculs d'indice IBG-DCE sur les 4 stations étudiées.

	2011				2013			
	Aulne		Mérantaise		Aulne		Mérantaise	
	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval
Groupe indicateur	Psycho myidae 4	Ephem eridae 6	Glosso matidae 7	Glosso matidae 7	Hydropsy chidae 3	Ephem eridae 6	Glosso matida e 7	Glosso matida e 7
Nombre de taxons	30	35	31	26	22	26	23	20
Nombre de taxons > 2								
individus	20	29	22	24	17	19	15	15
% EPT	0,6	7,0	24,8	7,5	6,1	14,4	25,8	11,3
% Chironomidae	25,4	59,2	15,0	31,0	12,9	9,2	26,0	36,6
% Oligochètes	56,0	14,0	6,5	4,0	39,7	21,6	14,0	4,2
note IBG-DCE	12	15	15	14	9	13	13	12
	Moyen	Bon	Bon	Bon	Médiocre	Moyen	Moyen	Moyen

Globalement, les notes calculées indiquent une qualité biologique des deux cours d'eau moyenne à bonne. Seule la note de 9 sur l'Aulne amont en 2013 indique une situation plus dégradée (Tableau 8).

Sur la Mérantaise, le groupe indicateur est le même à l'amont et à l'aval du seuil, et également lors des deux années. Il s'agit du groupe indicateur n°7 (Glossosomatidae et Goeridae en 2011, puis Glossosomatidae seulement en 2013) dont le niveau de sensibilité à la pollution est élevé. Leur présence indique un cours d'eau de bonne qualité. Un léger gradient amont-aval apparaît, la note de la station amont étant toujours supérieure d'un point à celle de l'aval en raison du nombre de taxons observés, plus important en amont.

Sur l'Aulne, les groupes indicateurs varient du n°6 à 3 (Ephemerae à l'aval et Psychomyiidae/Hydropsychyidae à l'amont), ce qui explique en partie la plus grande variabilité des notes d'indices (de 9 à 15 pour les deux stations et les deux années). Le gradient observé est inverse par rapport à la situation de la Mérantaise puisque la station aval du seuil est de meilleure qualité que celle de l'amont. Cette situation est à la fois justifiée par la présence à l'aval d'un groupe indicateur plus polluosensible (n°6, Ephemerae) et par une variété taxonomique plus élevée (1 classe de variété d'écart en 2011 et 2013).

Les EPT sont plus abondants à l'aval du seuil de Béchereau et plus abondant en amont du seuil d'Ors, ces tendances sont les mêmes pour les deux années de mesures. Il est à noter que l'habitat est plus diversifié à l'aval de Béchereau et en amont d'Ors.

Le pourcentage d'Oligochètes est toujours supérieur à l'amont des seuils alors que les Chironomes sont globalement plus abondants à l'aval des seuils. Cependant la somme des deux indique une altération globale du milieu, plus prononcée à l'amont des seuils.

Les notes sont globalement meilleures en 2011, en raison notamment de la variété taxonomique qui est plus importante qu'en 2013 à toutes les stations. L'année 2013 a été singulière d'un point de vue hydrologique car les niveaux d'eau ont été importants durant tout le printemps. L'analyse des données de débit a d'ailleurs démontré que le débit à plein bord a été dépassé à plusieurs reprises sur l'Aulne. Il est possible que cette situation ait entraîné une réduction du nombre de taxons présents sur les sites en 2013. Néanmoins, sur l'Aulne en 2011, le nombre de taxons à présence accidentelle (effectif de 1 individu) est suffisamment élevé pour expliquer une plus grande variabilité interannuelle des notes.

Les résultats observés pour l'Aulne sont équivalents à ceux mentionnés par l'étude Aquabio (2012) utilisant la même norme IBG sur la station Aulne à Bullion (Gallerie). Le groupe indicateur cité est les Ephemerae, avec 24 taxons et la note de 12, qualité « moyenne ». Le rapport mentionne un état biologique sur la Rémarde amont et ses affluents globalement moyens, avec des altérations ponctuelles de la qualité de l'eau, sans doute en lien avec les précipitations.

Globalement, les deux cours d'eau sont de qualité biologique comparable du point de vue des peuplements de macroinvertébrés benthiques. La situation de la Mérantaise semble toutefois moins sujette aux variations interannuelles puisque la composition qualitative et quantitative des peuplements de macroinvertébrés est plus stable.

6.3. Evolution temporelle des communautés de macroinvertébrés sur l'Aulne

Les 2 stations de l'Aulne, définies pour réaliser les mesures hydromorphologiques, sont utilisées comme stations de prélèvement des invertébrés. Cinq campagnes de prélèvement ont eu lieu : le 6 juin 2011, le 4 juin 2013, le 7 juillet 2016, le 26 juin 2017 et le 24 mai 2018.

Tableau 9 – Résultats des calculs d'indice IBG-DCE sur les 2 stations étudiées

	Aulne 2011		Aulne 2013		Aulne 2016		Aulne 2017		Aulne 2018	
	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval	Amont	Aval
Groupe indicateur	Baeridae 7	Ephemerae 6	Hydrpsychidae 3	Ephemerae 6	Baethidae 3	Ephemerae 6	Glossomatidae 7	Philopotamidae 8	Ephemerae 6	Ephemerae 6
Nombre de taxons	30	52	22	25	23	24	18	27	31	31
> ou = 2 individus	24	46	17	19	17	18	14	20	21	23
% EPT	0,5	7	6	14,5	1	8	2	5	2	6
% Chironomidae	25,5	59	13	9	7	4	34	13,5	80	44,5
% Oligochètes	56	14	40	21,5	6	9,5	18,5	5	11,5	9
note IBG-DCE	14	19	9	13	7	12	11	15	14	14
Etat cours d'eau	Bon	Très bon	Moyen	Bon	Mauvais	Moyen	Moyen	Bon	Bon	Bon

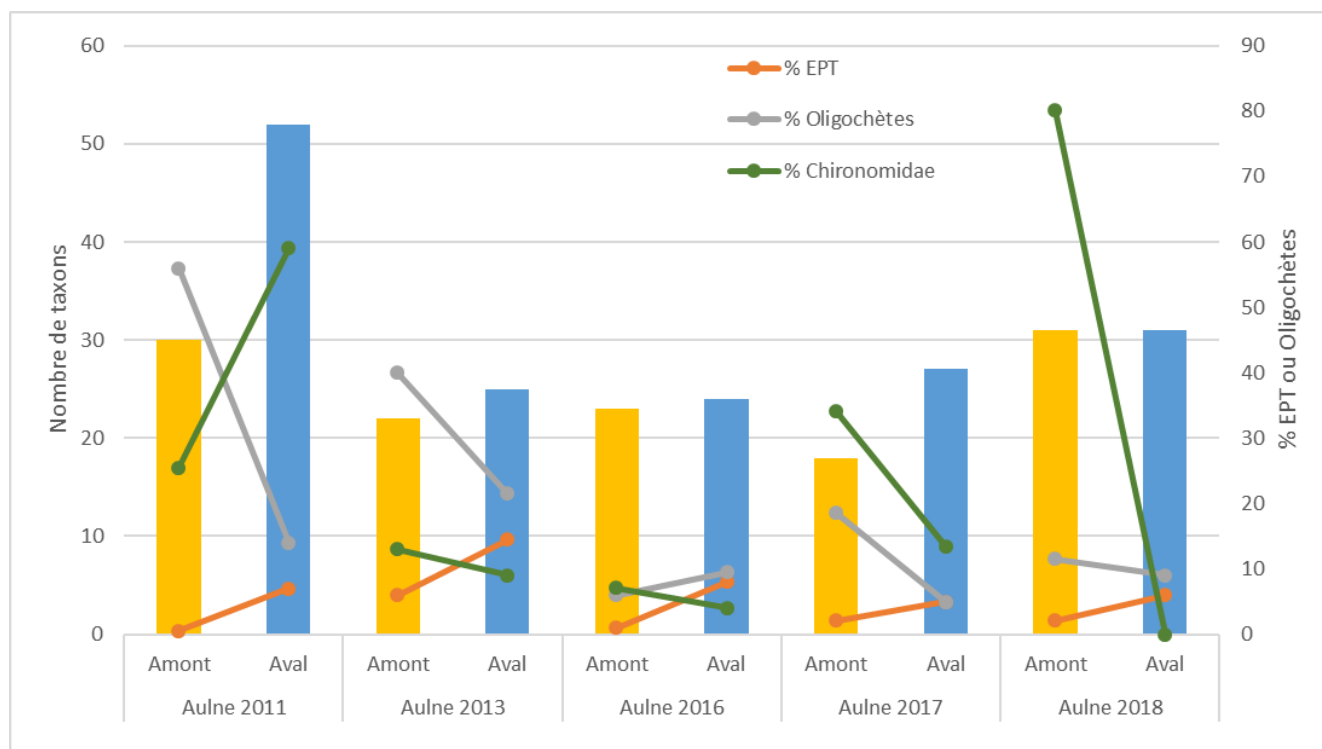
Globalement, les notes calculées indiquent une qualité biologique du cours d'eau moyenne à très bonne. Seules les notes de 9 et 7 sur l'Aulne amont en 2016 indiquent une situation plus dégradée (Tableau 8). Sur ces 2 stations, les groupes indicateurs varient du n°8 à 3 (Philopotamidae à l'aval et Hydrpsychidae à l'amont), ce qui explique en partie la plus grande variabilité des notes d'indices (de 7 à 19 pour les deux stations et les quatre années).

A l'aval du seuil, les notes sont bonnes à très bonnes sauf en 2016 où l'effet de la crue de juin 2016 décline la station à « moyen ». La meilleure qualité de la station en aval du seuil est justifiée par la présence d'un groupe indicateur plus polluosensible (n°8, Philopotamidae) et par une variété taxonomique plus élevée (1 classe de variété d'écart en 2013 et 2016, 3 classes en 2011 et 2017).

Les notes sont globalement meilleures en 2011 et 2017, en raison notamment de la variété taxonomique qui est plus importante qu'en 2013 et 2016, à toutes les stations. Les années 2013 et surtout 2016 ont été singulières d'un point de vue hydrologique car les niveaux d'eau ont été importants pendant tout le printemps en 2013 alors que 2016 a connu une crue majeure sur le secteur. L'analyse des données de débit a d'ailleurs démontré que le débit à plein bord a été dépassé à plusieurs reprises sur l'Aulne (FigureX). Il est probable que cette situation ait entraîné une réduction du nombre de taxons présents sur les sites ces deux années. Néanmoins, sur l'Aulne en 2011 et en 2017, le nombre de taxons à présence accidentelle (effectif de 1 individu) est suffisamment élevé pour expliquer une plus grande variabilité interannuelle des notes. Les notes de 2018 montrent un retour à une bonne qualité des deux stations.

Les EPT sont plus abondants à l'aval du seuil de Béchereau ; ces tendances sont les mêmes pour les quatre premières années de mesures sauf en 2018. Il est à noter que l'habitat est plus diversifié à l'aval de Béchereau. Les pourcentages d'Oligochètes et de Chironomidae sont

supérieurs à l'amont du seuil. Cela indique une altération globale du milieu, plus prononcée à l'amont du seuil.



6.4. Calcul des indices I2M2

Suite à l'application de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), dont la ligne directrice est le besoin d'un suivi de la qualité écologique des cours d'eau, et au besoin de méthodes de bioévaluation plus performantes, un nouvel indice a été développé pour les invertébrés benthiques, l'Indice Invertébrés Multi-Métrique (I2M2). Cet indice remplace depuis 2016 l'indice actuel, l'IBGN. Les macro-invertébrés benthiques sur l'Aulne ont ainsi été échantillonnés en 2016 et 2017 selon le protocole mis en place pour le réseau de contrôle et de surveillance (RCS) (Norme XP T 90-333, AFNOR, 2009), afin d'établir un I2M2.

Tableau 10 – Résultats des calculs d'indice I2M2 sur les 2 stations étudiées

AULNE AMONT

Date	I2M2	Nb Taxons	Shannon	ASPT	Polyvoltinisme	Ovoviviparité	Richesse
07/06/2011	0,0824	30	0,1342	0,0206	0	0,1133	0,186
04/06/2013	0,0735	22	0,8140	0,0346	0	0	0
07/07/2016	0	20	0	0	0	0	0
26/06/2017	0,0249	18	0,1456	0	0	0	0
24/05/2018	0,1297	31	0,0095	0,0934	0,1117	0,2185	0,2093

AULNE AVAL

Date	I2M2	Nb Taxons	Shannon	ASPT	Polyvoltinisme	Ovoviviparité	Richesse
------	------	-----------	---------	------	----------------	---------------	----------

06/06/2011	0,3989	52	0,2456	0,4223	0,3288	0,4186	0,6047
04/06/2013	0,1097	25	0,3026	0,1217	0	0,0893	0,0698
07/07/2016	0,1291	20	0,0173	0,3285	0,1221	0,1164	0
26/06/2017	0,4060	27	0,0032	0,7648	0,4120	0,5569	0,1163
24/05/2018	0,3056	31	0,2778	0,5603	0,1147	0,3358	0,2093

6.5. Interprétation des calculs des indices I2M2

Grâce au Système d'Évaluation de l'État des Eaux (SEEE), les probabilités d'altération de la communauté de macroinvertébrés, causées par différentes pressions, ont été calculées pour les stations Aulne aval et amont depuis 2011. (Voir annexe 3 bis).

Les notes I2M2 montrent un état correct pour l'Aulne aval et plutôt médiocre pour l'amont, avec une baisse significative en 2013 et 2016, en lien avec les conditions hydrologiques de ces 2 années.

La faiblesse de la richesse et de l'indice de Shannon, surtout en amont, révèle un problème hydromorphologique sur la rivière, avec des habitats assez uniformes dans ce secteur.

Les probabilités de perturbations dues aux nitrates, pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dues à l'anthropisation du bassin versant et à l'instabilité hydrologique sont élevées.

La variabilité importante des probabilités de perturbations liées aux matières organiques, phosphatées et azotées, suivant les différentes années de prélèvement, montre que L'Aulne, surtout dans sa partie aval, est soumise à un fort ruissellement, notamment suite aux épisodes pluvieux de 2013, 2016.

Ces résultats sont, en conclusion, ceux d'un cours d'eau péri-urbain perturbé, notamment en amont du seuil de Béchereau.

7. Inventaires des frayères à truite et du peuplement de poissons

Les inventaires du peuplement de poissons par pêche électrique et les recensements de frayères réalisés en 2008 et 2009 par le PNR HVC, ont montré l'absence de truites sur les secteurs de cours d'eau en amont du seuil d'Ors et de Béchereau. Les inventaires de frayères présentés sont donc limités aux secteurs en aval de ces ouvrages.

7.1. Inventaire des frayères à truite de 2008 à 2014

Le recensement hivernal des frayères creusées par les géniteurs de truite fario est proposé comme un paramètre permettant d'évaluer leur présence et leur activité sur les cours d'eau étudiés. Le suivi de leur nombre et de leur localisation peut être préconisé comme indicateur des actions entreprises sur les cours d'eau, notamment lors des projets de restauration.

La ponte s'effectue sur un substrat de petits galets ou de graviers, présentant des interstices pour l'oxygénation des œufs, avec des hauteurs d'eau de 15 à 50 cm et des vitesses de 40 et 80 cm/s. En général, on trouve les frayères en « tête » de radier (amont du radier et aval d'une mouille). La durée totale d'incubation et du développement embryonnaire dans la frayère est variable, de 3 à 4 mois après la ponte.

Ainsi, chaque année, un inventaire des localisations des frayères fonctionnelles de truite est réalisé par le PNR Haute Vallée de Chevreuse. La prospection des cours d'eau s'est faite à pied en longeant la berge. Chaque frayère (nid creusé correspondant à la dépose des œufs) a été cartographiée et géolocalisée. Les inventaires sont réalisés sur les secteurs suivants:

- sur la Mérantaise, entre l'aval des Ponts de Pierre et le seuil d'Ors
- sur l'Aulne, entre l'aval de la Galetterie et le seuil du moulin de Béchereau ainsi que l'amont et l'aval de La Bâte

Les Figure 40 et Figure 41 montrent la répartition spatiale des frayères de 2008 à 2014.

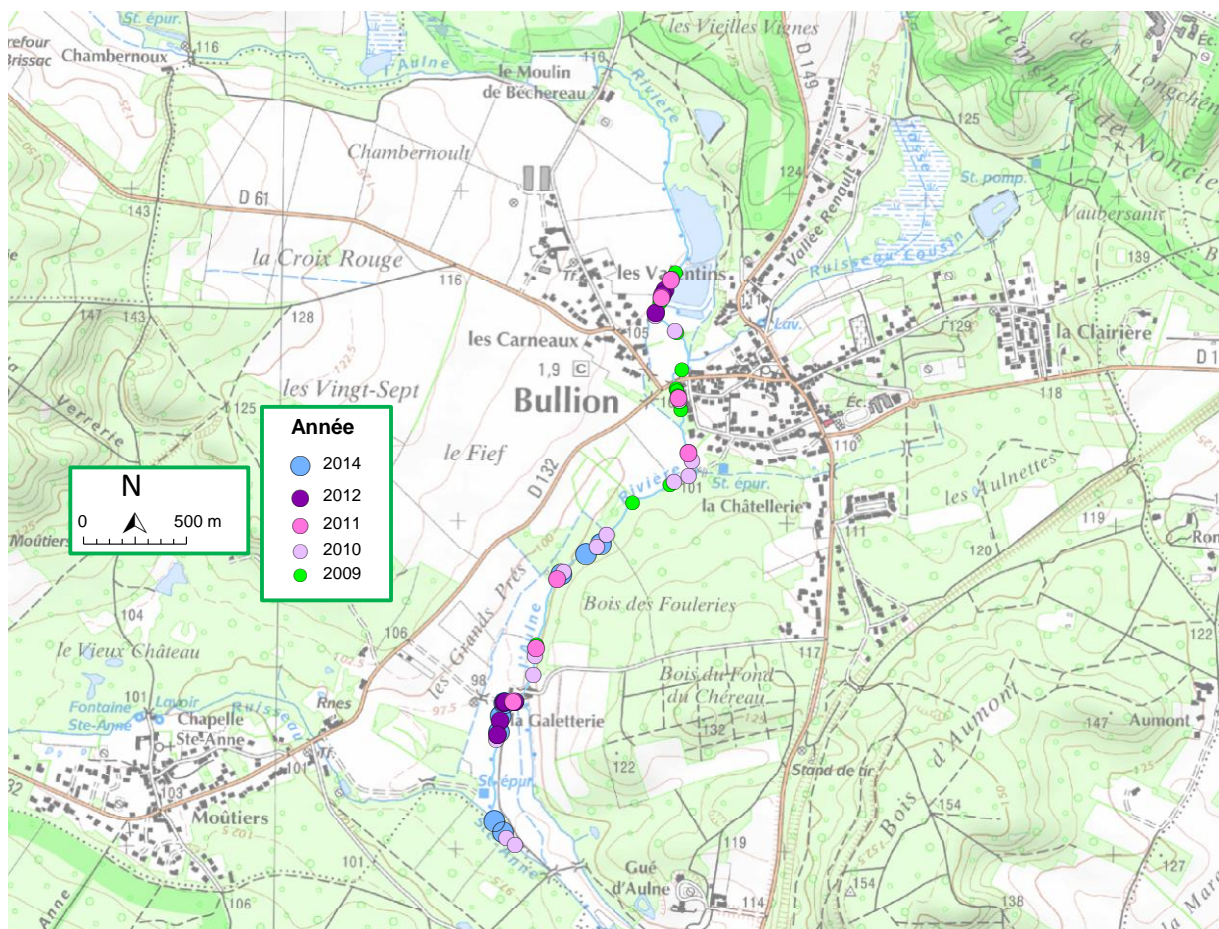


Figure 40 – Inventaire des frayères à truite de 2009 à 2014 sur l'Aulne (pas d'inventaire en 2013).

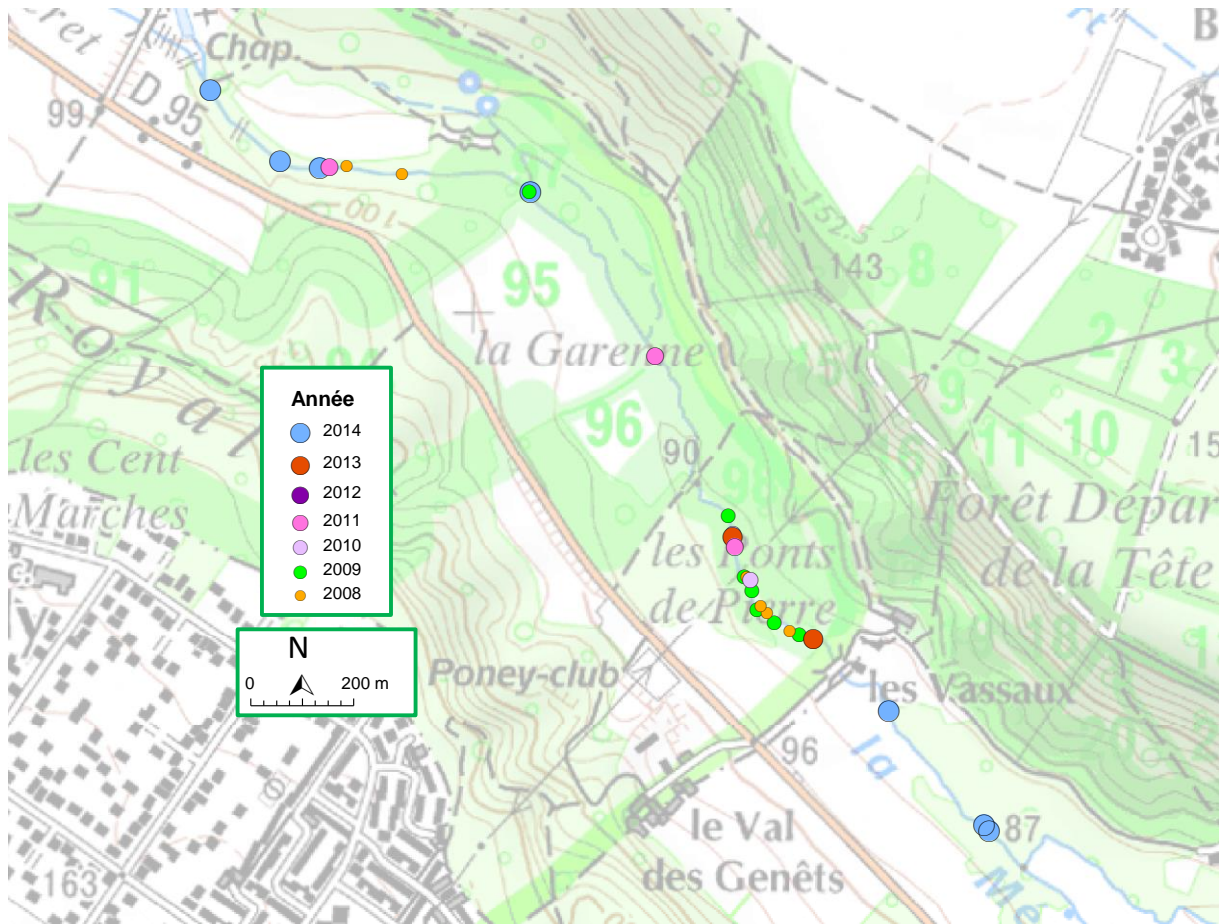


Figure 41 – Inventaire des frayères à truite de 2008 à 2014 sur la Mérintaise.

Sur la Mérintaise, la plupart des frayères sont présentes à l'aval des Ponts de Pierre sur une distance de 200 m. Quelques frayères occasionnelles sont aussi observées à l'aval immédiat du seuil d'Ors et en aval des Vassaux en 2014.

Sur l'Aulne elles sont mieux distribuées longitudinalement de Bullion à la confluence du ruisseau St-Anne, cependant aucune n'est observée sur les 900 m en aval du seuil de Béchereau. L'évolution temporelle de la localisation des frayères montre que certains secteurs sont choisis régulièrement et que d'autres diffèrent selon l'année. Ces 7 années d'observation donnent une idée de l'enveloppe des habitats potentiellement favorables à la reproduction des truites.

Ces frayères attestent de l'activité de reproduction des truites matures présentes dans le secteur. La maturité est observée pour des individus à partir de 2 à 3 ans comme en atteste les marques visibles sur les écailles (voir § 8.2.1) ; certains se sont reproduits plusieurs années consécutives.

Compte tenu du linéaire prospecté, on observe en moyenne 3,4 frayères/km sur la Mérintaise et 4,9 frayères/km sur l'Aulne. Des valeurs de 1 à 5,5 frayères/km ont été comptabilisées sur des sous-bassins versants de l'Orne par la FDPPMA (2003). Des valeurs allant de 11 à 100 frayères/km ont été observées pour certaines parties de cours d'eau à fort potentiel dans ce département.

Il est important de préciser que l'inventaire sous-estime très certainement le nombre de frayères. En effet, les inventaires ont lieu, selon les années, en octobre, novembre décembre

ou janvier et ne couvre pas l'ensemble de la période de reproduction sur chaque cours d'eau. Pour la reproduction de 2012 par exemple, de nouvelles frayères ont été aperçues le 23 janvier 2013 sur la Mérantaise mais ne figurent pas dans l'inventaire de 2012.

7.2. Echantillonnage des poissons par pêche électrique

Le protocole de pêche électrique est réalisé de façon à pouvoir détecter les effets des discontinuités dans les cours d'eau sur la distribution spatiale des espèces de poissons. En 2009, nous avons élaboré un échantillonnage ponctuel d'abondance (EPA) basé sur la prise en compte d'obstacles majeurs dans le bassin ainsi que sur la présence des confluences.

Le protocole d'échantillonnage des poissons par pêche électrique réalisé sur les cours d'eau de tête de bassin (ordre 1-3, largeur 2-5m) a été adapté pour répondre à la problématique de l'étude de l'influence des discontinuités et de la structure des habitats aquatiques sur la distribution des poissons. Ainsi, un échantillonnage ponctuel d'abondance (EPA) a été préféré à une prospection classique sur station. En effet, généralement une station de pêche est définie comme étant une portion de rivière longue de 10 à 20 fois la largeur au miroir (soit ici des stations de 100m de long maximum), cette portion étant ensuite prospectée totalement. Ce protocole permet de connaître la richesse spécifique de la zone considérée et d'avoir des abondances absolues sur la station, mais il est peu adapté à l'étude de la répartition longitudinale des populations de poissons lors de la présence de discontinuités longitudinales impactant le peuplement de poissons comme la présence d'un obstacle physique. L'utilisation de la méthode des EPA, réalisé à l'aide du matériel de pêche électrique « Martin pêcheur », permet de prospecter des linéaires plus importants (plusieurs kilomètres) et surtout difficilement accessibles.

Nous avons choisi de réaliser dans ce type de cours d'eau, un point de pêche EPA tous les 20 m le long du continuum fluvial, chaque point de pêche étant disposé de façon aléatoire transversalement au cours d'eau (rive droite, rive gauche, chenal). Cette distance est choisie pour éviter d'influencer les points de pêches entre eux. Ainsi, des segments de 600 m, représentant 30 EPA ont été répartis en amont et aval des deux seuils étudiés (*Figure 42*). Les pêches ont été réalisées les 30 et 31 août 2011, les 26 et 27 août 2013 et les 26 août et 9 septembre 2015.

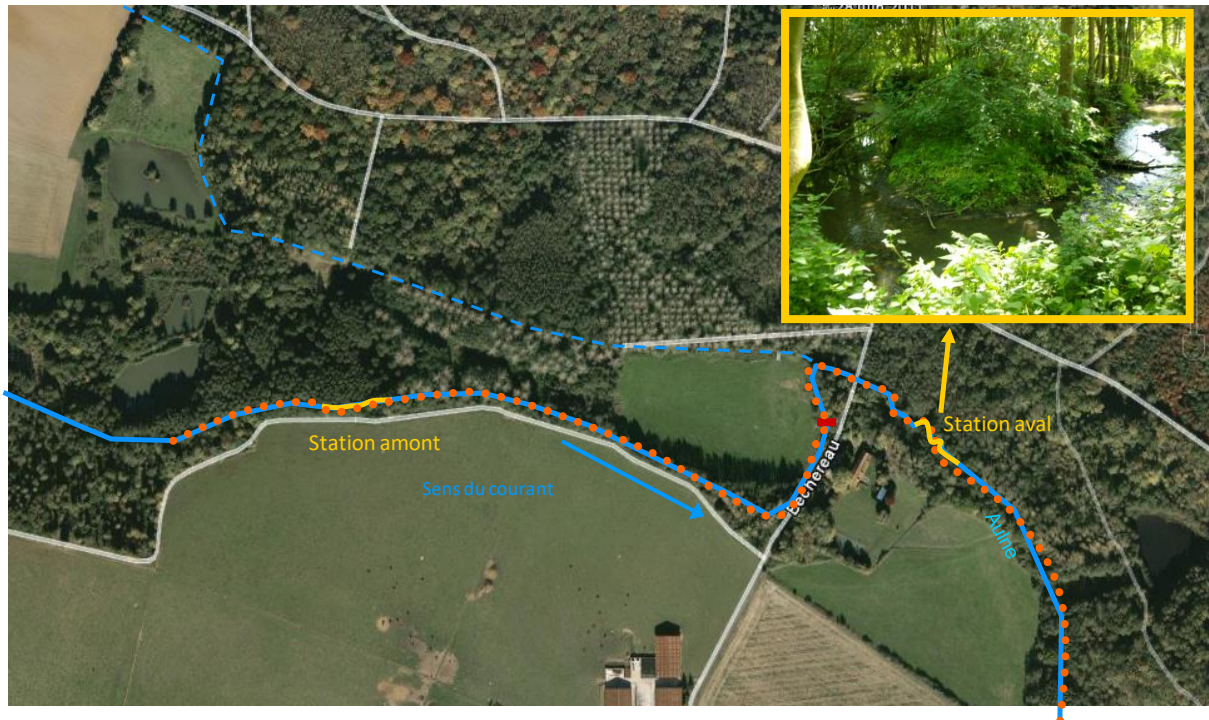


Figure 42 – localisation des stations amont et aval du moulin de Béchereau (en jaune) et position des échantillonnages par pêche électrique selon la méthode des EPA (points oranges),

La zone d'influence de l'ensemble anode-cathode du matériel de pêche est estimée à 10 m²; soit 1,8 m de rayon. Les poissons capturés sont identifiés et mesurés individuellement in situ, puis remis à l'eau (Figure 43). Chaque point de pêche est localisé au GPS (+/-5m).



Figure 43 – Pêche électrique au pied du seuil du moulin de Béchereau 2013; truite fario capturée.

Parmi les espèces caractéristiques des têtes de bassin des cours d'eau, on retrouve la présence des truites sur les deux cours d'eau (Tableau 9). Cependant l'abondance est plus élevée sur les 600 m aval du seuil d'Ors que sur les 600 m aval du seuil de Béchereau. L'espèce est absente en amont des deux seuils confirmant les précédentes prospections réalisées par le PNR.

Tableau 9 – Effectifs capturés par cours d'eau et par année (en grisé les espèces typiques de ces cours d'eau).

	Seuil de Béchereau						Seuil d'Ors					
	aval			amont			aval			amont		
	2011	2013	2015	2011	2013	2015	2011	2013	2015	2011	2013	2015
Truite fario	1	1	6				13	10	8			
Chabot	7	19	18	12	13	11						
Loche franche	6	2	22	18	10	26	42	3	20	20	9	9
Gardon	5	2	2			1	1					
Perche commune	10	1	3	10		8						
Rotengle			4	7								
Perche soleil							3	1				
Epinochette			1	2		19	13		6	10	4	17
Epinoche							13	1		7	22	
Anguille							1					
Brochet	1	1										
Goujon							1					
Nombre d'espèce	6	6	7	5	2	5	8	4	3	3	4	2

Deux espèces d'accompagnement de la truite, la loche franche et le chabot, sont bien implantées sur l'Aulne alors que le chabot est absent de la Mérantaise, ainsi que de l'Yvette (portion la plus urbanisée du bassin versant de l'Orge). Sur l'Aulne, l'implantation des espèces d'eau calme comme la perche, le gardon, le rotengle est favorisé par les aménagements qui entraînent le ralentissement des écoulements et l'augmentation des habitats profonds. Sur la Mérantaise, ce sont plutôt la perche-soleil, l'épinoche et l'épinochette qui sont abondantes, peuplant généralement des secteurs de cours d'eau ayant fait l'objet de recalibrage, où la végétation aquatique se développe. Un seul individu de quelques espèces est capturé certaines années : anguille, brochet et goujon.

On remarque une stabilité temporelle des espèces typiques de ces petits cours d'eau ainsi que de certaines espèces eurytopes (perche commune et gardon sur l'Aulne à l'aval du seuil de Béchereau) indiquant une implantation pérenne de ces espèces.

La variabilité de la richesse spécifique reste importante selon les années en lien avec la capture d'espèce rares. La richesse reste en moyenne plus forte à l'aval des deux seuils comparé à l'amont avec globalement plus d'espèces sur l'Aulne que sur la Mérantaise.

Dans le cas de ces petits bassins versants, l'anthropisation et la présence d'aménagement entraînent donc une augmentation du nombre d'espèces et une modification de la composition

des peuplements, avec généralement une augmentation des espèces d'eau calmes, en lien avec le ralentissement des écoulements.

La répartition spatiale des truites fario est présentée sur les Figure 44 et Figure 45. On remarque l'absence d'individus dans les EPA situées en amont du seuil d'Ors et du seuil de Béchereau. Sur la Mérantaise, une partie des individus sont situés sous la chute du seuil d'Ors ainsi qu'à l'aval de la chute générée par le collecteur d'eaux usées (Figure 44). Les habitats favorables à cette période de basses eaux de fin d'été sont situés également plus en aval sur l'amont d'un secteur alternant les radiers et moulles avec de fortes densités d'abris (carte non présentée, voir l'hétérogénéité d'habitat Figure 38).

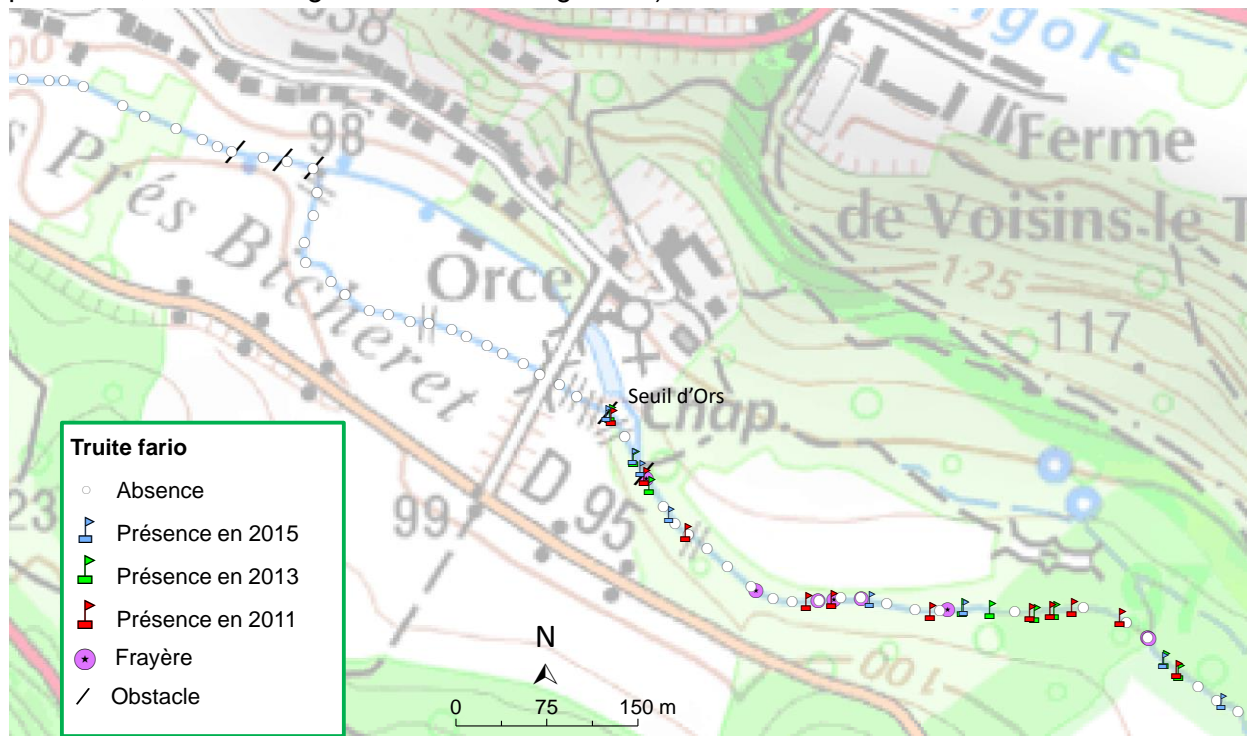


Figure 44 – Distribution spatiale des truites capturées par pêche électrique en 2011, 2013 et 2015 sur la Mérantaise; 600m en amont et en aval du seuil du moulin d'Ors.

Les individus capturés en 2011 sur ce secteur de la Mérantaise sont principalement des jeunes de l'année (0+), mesurant fin août environ 100 mm ; on retrouve en partie cette cohorte en août 2013 dans les 2+ (Figure 46). Dans le secteur échantillonné sur la Mérantaise, on observe des frayères. Cependant, en 2013 et 2015 peu d'individus 0+ sont capturés sur ce secteur, ce sont essentiellement des 1+/2+. Les jeunes de l'année sont situés en 2013 plus en aval dans un secteur à forte densité de radiers (voir plus loin, Figure 48).

Sur les 600 m aval immédiat du seuil de Béchereau, peu de truites sont capturées chaque année; les individus ont tous plus de 2 ans (Figure 46, 2+). Les frayères sont situées bien plus en aval que les échantillonnages (Figure 45) et les habitats de ce secteur sont moins favorables. Le secteur où quelques individus sont présents correspond à la présence de moulles et d'abris (voir Figure 39).

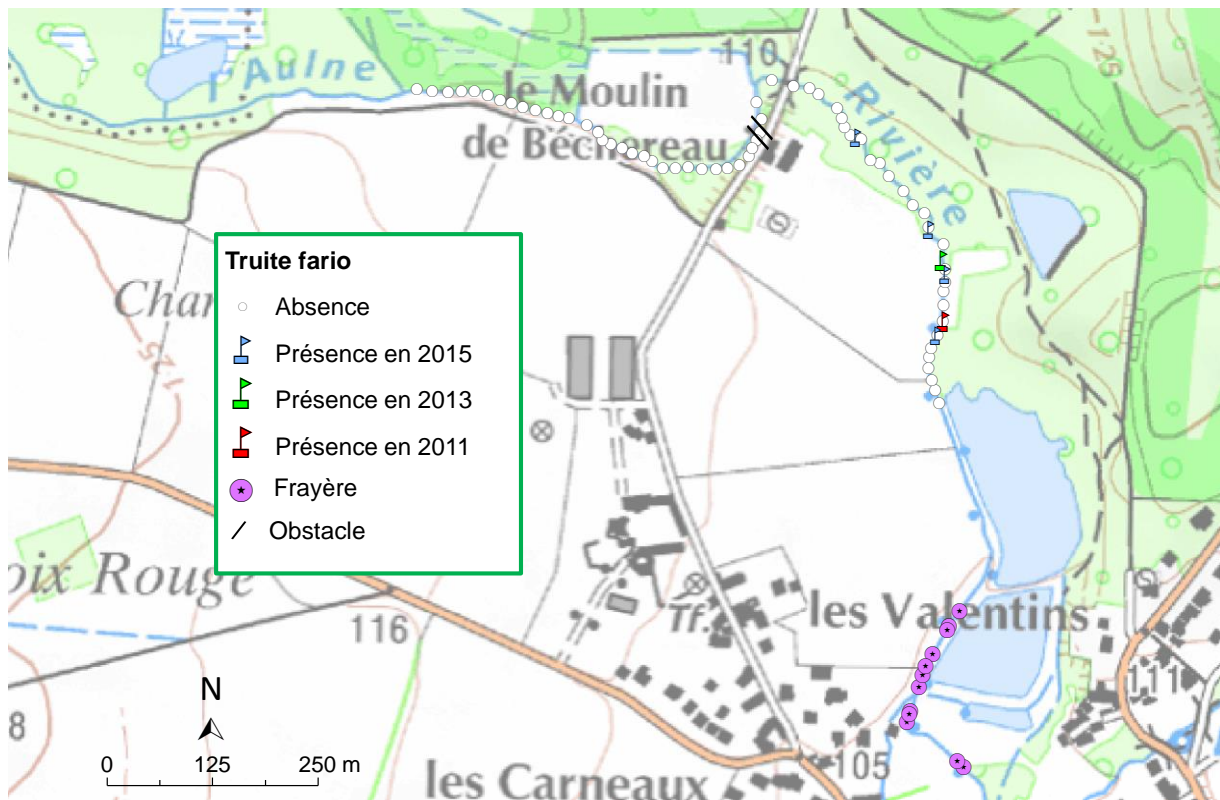


Figure 45 – Distribution spatiale des truites capturées par pêche électrique en 2011, 2013 et 2015 sur l'Aulne ; 600m en amont et en aval du seuil du moulin de Béchereau,

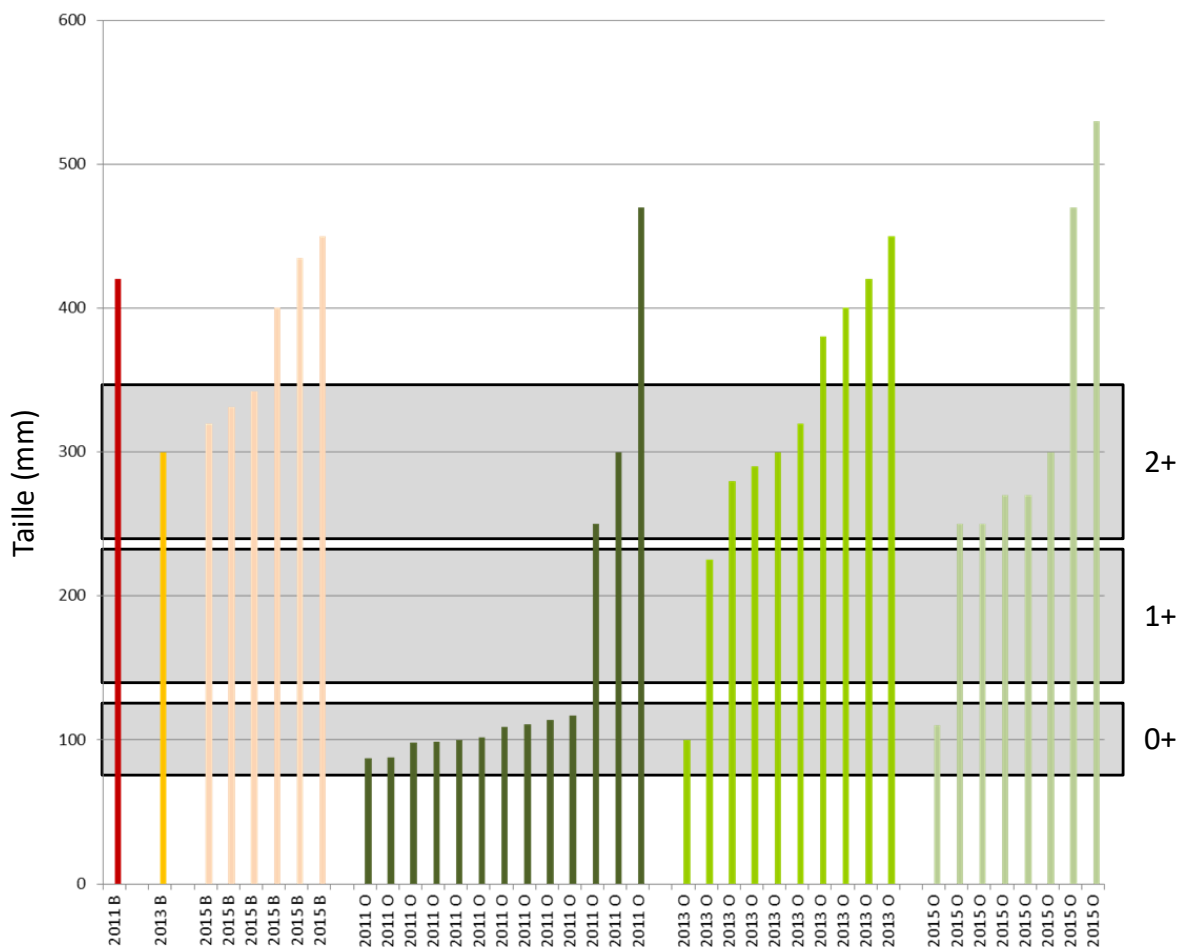


Figure 46 – Taille (mm) des truites capturées par pêche électrique en 2011, 2013 et 2015. Ages indicatifs, donnés à partir de la relation taille/âge issu de la lecture des écailles des individus échantillonnés en 2012. B : Béchereau ; O : Ors

7.3. Inventaire des juvéniles de truites (0+ et 1+) par pêche électrique

Le protocole utilisé est celui de Prévost et Baglinière (1993). Il a été mis en œuvre les 17 et 18 octobre 2013 sur les secteurs correspondant à ceux du suivi téléométrique (Figure 59).

Le porteur de l'anode place les porteurs d'épuisettes à l'aval d'une zone de 4-5 m de long qu'il va balayer avec l'anode, dans un secteur de radier ou de plat courant. Les poissons attirés puis "choqués" par le courant électrique descendent dans les épuisettes guidés par l'anode et poussés par le courant. Les poissons sont transférés dans des seaux ou mesurés dans l'épuisette lorsqu'ils sont peu nombreux.



Figure 47 – Truitelle de 100 mm

L'opération est renouvelée sur le radier ou plat courant amont suivant, non perturbé par le "trait" précédent, en prenant garde de ne pas marcher sur la zone et de se déplacer le plus discrètement possible.

Ce protocole a été utilisé en juillet 2011 par le PNR HVC pour réaliser des inventaires sur l'Yvette amont (Maincourt), sur l'Aulne à l'aval de la Galleterie et sur la Mérantaise, à proximité des Ponts de Pierre. Les résultats sont présentés dans le Tableau 10. Les truites de taille 60-70 mm correspondent aux jeunes de l'année (0+), ils sont majoritaires sur les radiers de l'Aulne à la Galleterie et sur la Mérantaise 1. L'abondance en jeunes de l'année est plus faible dans les secteurs Mérantaise 2 et 3, bien que le temps de prospection soit le même. Les individus plus grands sont des 1+ et 2+.

Tableau 10 : Effectifs de truites capturées sur l'Aulne et la Mérantaise par le PNR HVC en juillet 2011. Les codes sur la Mérantaise correspondent aux localisations de la Figure 44.

	Longueur totale (mm)		
	[60-70]	[100-180]	[200-300]
Aulne aval Galetterie	20	3	1
Mérantaise 1	34		2
Mérantaise 2	4	1	5
Mérantaise 3	2		6

Les résultats des prospections 2013 sont présentés sur les Figure 48 et Figure 49.

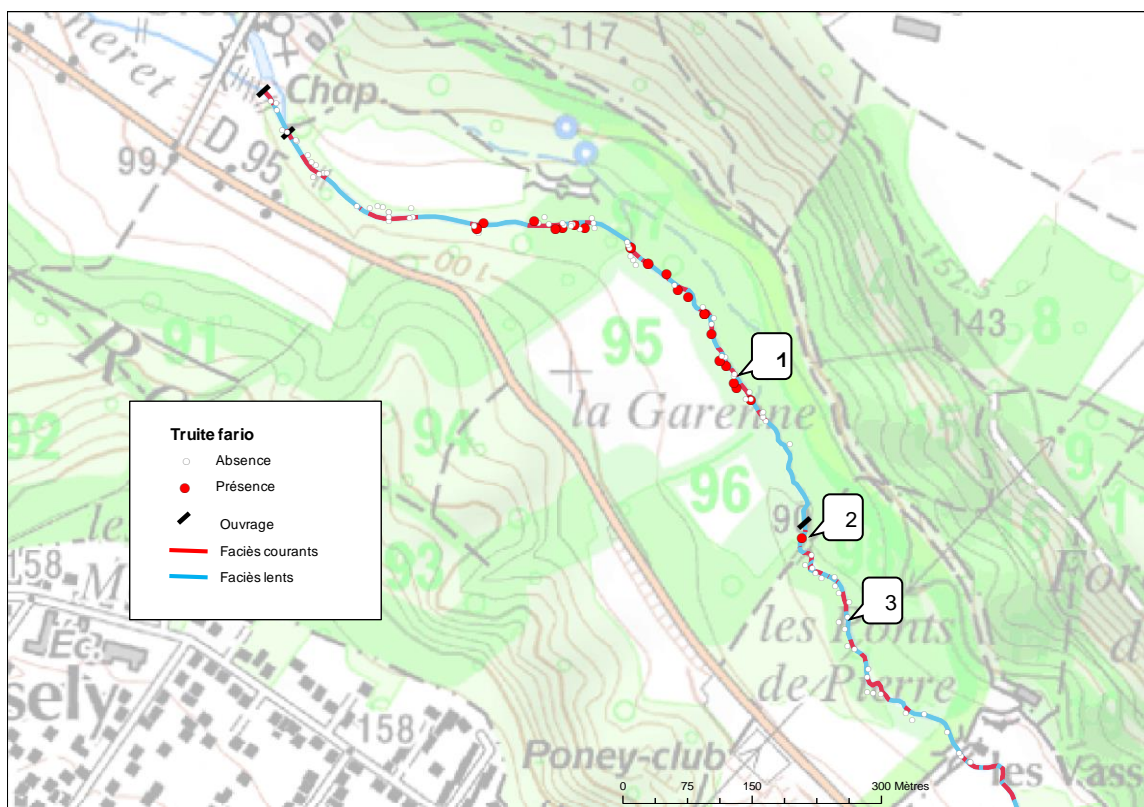


Figure 48 – Distribution spatiale des juvéniles de truites capturées par pêche électrique en 2013 sur la Mérantaise ; échantillonnage des radiers ou plats courants. Les bulles numérotées correspondent aux localisations des pêches sur radiers, effectuées par le PNR HVC en 2011.

Sur la Mérantaise, la présence des juvéniles est principalement concentrés sur un secteur de 450 m, entre l'amont des Ponts de pierre et l'aval de la réserve d'Ors. Ce sont quasiment que des jeunes de l'année, 0+ (Figure 50), échantillonnés sur 15 radiers. Ce secteur, correspond au secteur Mérantaise 1, prospecté en 2011, pour lequel, de nombreux juvéniles avaient été observés. Il correspond, dans le profil en long, à la « fosse 3 » (Figure 24) ; dans ce secteur, de nombreuses mouilles assez profondes sont présentes. On remarquera que les jeunes de l'année sont quasiment absents en 2013 du secteur des Ponts de pierre (Mérantaise 2 et 3). Bien que le débit de plein bord n'ait pas été atteint sur la Mérantaise, les forts débits ont pu perturber le développement des œufs sur les frayères dans certains secteurs déjà très courants.

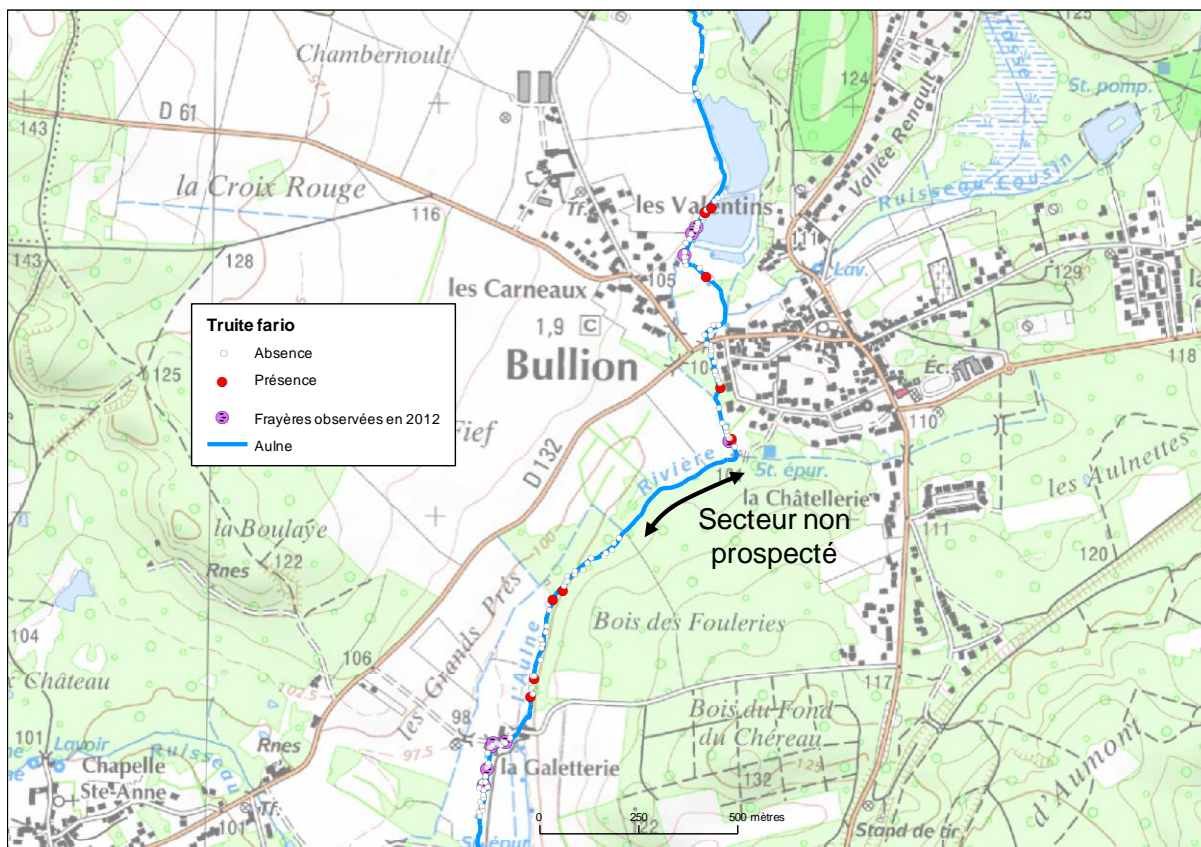


Figure 49 – Distribution spatiale des juvéniles de truites capturées par pêche électrique en octobre 2013 sur l’Aulne ; échantillonnage des radiers ou plats courants.

Sur l’Aulne, un seul jeune de l’année, 0+, a été observé en amont de la Galetterie ; les autres individus sont des 1+ (Figure 50). En particulier, aucun 0+ n’a été observé en 2013 sur les radiers à l’aval de la Galetterie ; radiers sur lequel 20 individus 0+ avaient été échantillonnés en 2011 (Tableau 10). Cette absence, quasi-totale, de jeunes de l’année sur l’ensemble des radiers et plats courants de ce secteur de l’Aulne est probablement en partie liée à l’hydrologie de l’hiver 2012. Plusieurs crues dépassant le débit de plein bord ont été observées fin décembre et fin janvier. Les sables déposés sur les berges témoignent de la mobilisation des substrats et du probable colmatage des frayères qui avaient été observées sur le secteur (Figure 48, Figure 49). Ces crues peuvent aussi avoir été dommageables lors de l’émergence des alevins (fin janvier-février).

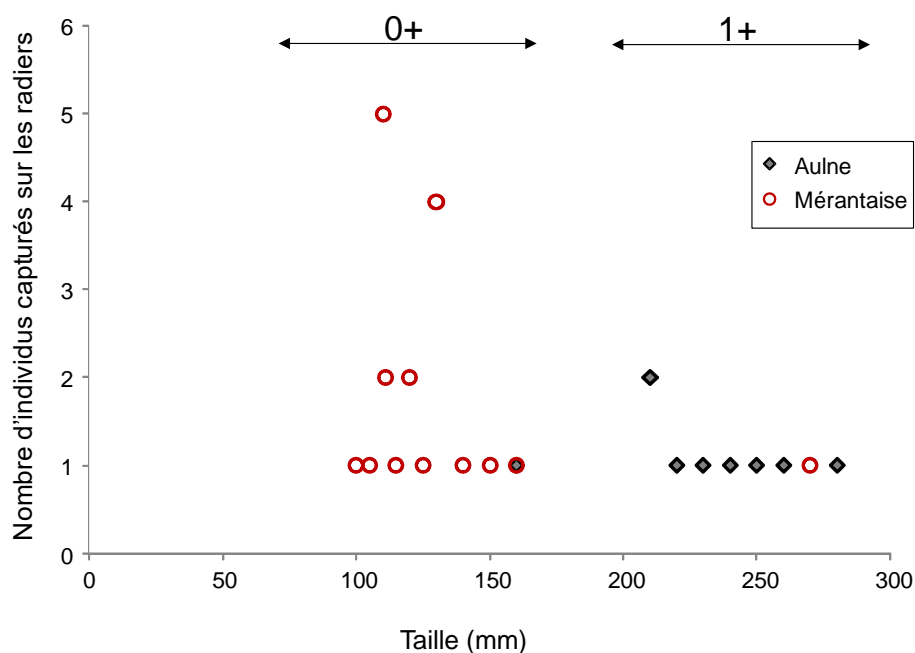


Figure 50 – Distribution des tailles de juvéniles de truites sur l’Aulne et la Mérantaise en 2013. Ages donnés à titre indicatif.

7.4. Echantillonnage du peuplement de poissons par pêche électrique complète

Le 13 octobre 2016, une pêche électrique complète à 2 passages a été réalisée sur les stations Béchereau amont et aval afin d’évaluer un potentiel effet de la crue de juin 2016 sur le peuplement de poissons. Les effectifs estimés par la méthode de Carle et Strub et rapportés à 100m² sont indiqués dans le Tableau 11.

La loche franche et le chabot domine le peuplement comme cela a été observé précédemment (Tableau 9) lors du suivi temporel réalisé à l’aide de pêche électrique par EPA. Les espèces présentes en faibles effectifs sont aussi celles habituellement observées : la perche commune, le rotengle pour les deux stations et le gardon et l’épinochette pour la station amont. On note exceptionnellement cette année une présence en amont de l’able de Heckel. Cette espèce, non capturée dans les précédents échantillonnages, inféodée aux eaux lentes et riches en végétation, provient certainement des étangs situés en amont (poisson fourrage) et dont il existe une connexion par débordement à 100m en amont de la station Béchereau amont (Figure 51). A la faveur des débordements liés à la crue de juin 2016, elle a pu coloniser le cours d’eau qui présente essentiellement des plats lents et courants, situés dans la zone de retenue du seuil de Béchereau.

Globalement on a capturé, cette année plus d’espèces en amont du seuil qu’à l’ordinaire 7 espèces contre 2 à 5 espèces habituellement avec un potentiel de 6 espèces sur 2011-2015, alors qu’à l’aval seulement 4 espèces sont capturées contre 6-7 habituellement. Ces différences liées à la présence d’espèces à faible effectif est sans doute en lien avec la crue exceptionnelle de juin 2016 qui a contraint certaines espèces comme la truite² à se réfugier plus en aval où des mouilles sont disponibles.

Tableau 11– Effectifs capturés et estimés par la méthode Carle et Strub.

Béchereau amont du seuil:

7 Espèces	Effectif pêché	P1	P2	Effectif estimé	Effectif estimé pour 100m ²
LOCHE FRANCHE	45	19	26	147	76,5
CHABOT	39	23	16	57	26,5
ABLE DE HECKEL	13	11	2	13	6,5
PERCHE COMMUNE	9	5	4	11	5,5
ROTENGLE	3	2	1	3	1,5
GARDON	1	1		2	1
EPINOCHETTE	1		1	1	0,5
Totaux	113	61	52		

Béchereau aval du seuil:

4 Espèces	Effectif pêché	P1	P2	Effectif estimé	Effectif estimé pour 100 m ²
LOCHE FRANCHE	22	12	10	33	16,5
CHABOT	21	14	7	24	12
PERCHE COMMUNE	5	3	2	5	2,5
ROTENGLE	1		1	1	0,5
Totaux	97	51	46		

7.5. Potentialités de détection des peuplements de poissons à l'aide de l'ADN environnemental

Les potentialités de l'ADN environnemental comme indicateur de biodiversité sont actuellement évaluées dans diverses études nationales mais aussi régionales. Ses potentialités comme indicateur de biodiversité, intégratif et déployable à l'échelle européenne, la rendent incontournable à brève échéance ; sa mention comme « variable de biodiversité essentielle » est déjà clairement faite par les instances nationales et européennes (FRB et GEO-BON).

Une étude réalisée sur le bassin versant de l'Orgeval (77) (Tallec et al., 2018) a évalué ce nouvel outil à travers un suivi temporel mensuel d'ADNe entre septembre 2016 et février 2018 effectué sur une station à l'exutoire du bassin de l'Orgeval. Le nombre d'espèces recensées varie de 3 à 21 espèces selon les conditions hydroclimatiques (débit et température) précédant la date du prélèvement. Le nombre d'espèces recensées a tendance à augmenter avec l'augmentation de variation du débit et à diminuer avec l'augmentation de variation de température. Une comparaison préliminaire entre échantillons d'ADNe et par pêche électrique indique que le metabarcoding est plus intégrateur.

7.5.1. Protocole

Les prélèvements d'ADNe ont été réalisés sur trois stations de l'Aulne, en amont et aval de Béchereau et en aval du seuil de la Galetterie (Figure 51). Les prélèvements d'ADNe ont été effectués au mois de septembre 2016 et en janvier 2017.

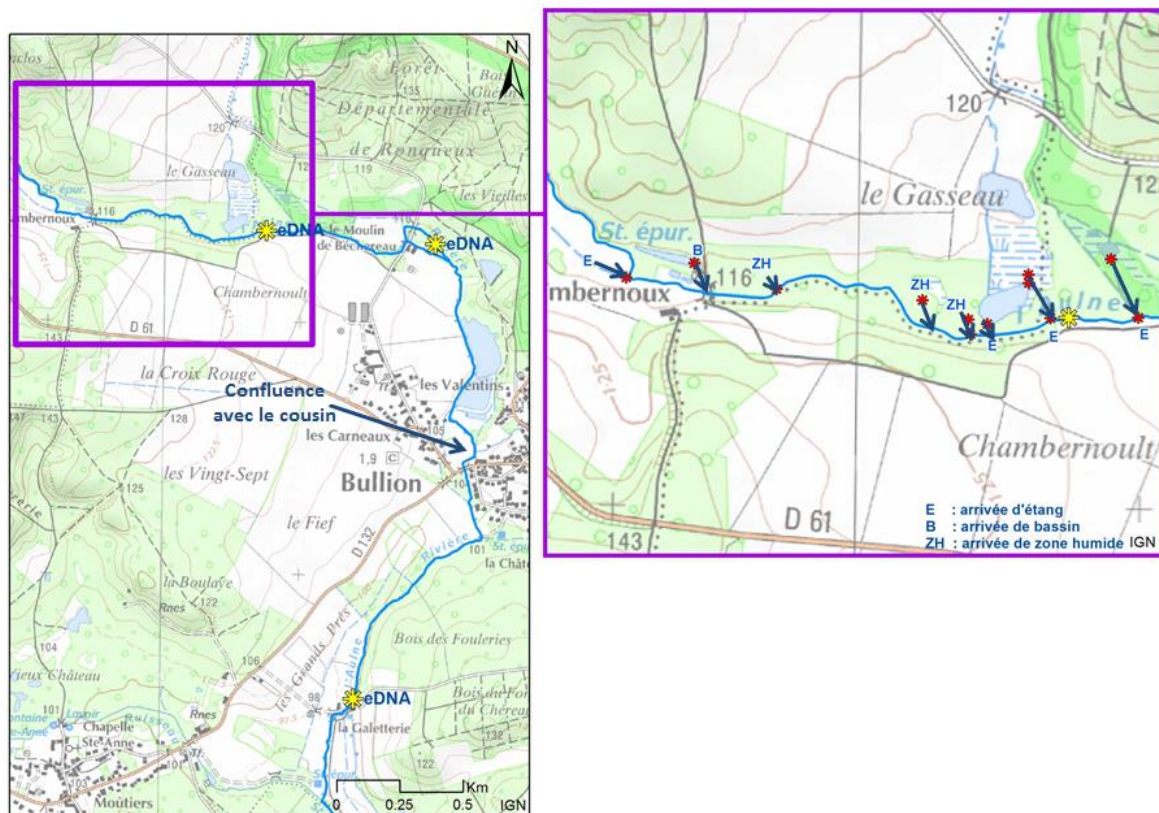


Figure 51 – Localisation des stations de prélèvement de l'ADN (à gauche, sigle jaune) et détail des connexions de l'Aulne avec des arrivées d'eau d'étangs, de bassins ou de zones humides à proximité de la station Béchereau amont (à droite, flèches).

Chaque prélèvement suit un protocole précis développé par Spygen, soit trois filtrations d'eau de rivière, de 30 min environ chacune, à travers une capsule de filtration stérile à usage unique (kit VigiDNA RW) (Figure 52). Pour chaque prélèvement, à l'issue de la filtration, les trois capsules sont remplies d'une solution tampon et envoyées au laboratoire Spygen pour analyse. Au cours de chaque prélèvement sont aussi effectuées, i) une mesure de débit en sortie de filtre lors de la première filtration, et ii) une mesure de la qualité de l'eau (pH, conductivité, oxygène dissous, température) à l'aide d'un analyseur portable WTW, MultiLine® Multi 3620 IDS.

Pour chaque capsule de filtration, le laboratoire Spygen donne, pour chaque échantillon d'ADN extrait via un primer ciblant un groupe taxonomique (téléostéens spécifique dans notre étude), le nombre de répliques PCR positif sur les 12 effectués et donne le pourcentage relatif de séquence ADN correspondant. On note également que lors de l'analyse, des contrôles négatifs pour la PCR sont réalisés pour détecter une éventuelle contamination. Des tests d'inhibition de PCR, due à la présence d'acide humique dans l'échantillon, sont également effectués.



Figure 52. Prélèvement d'ADNe sur l'Aulne (source : Irstea)

7.5.2. Résultats

A partir des résultats bruts fournis par SpyGen, nous avons calculé le pourcentage de réplicas positifs (nombre de positifs sur les 12 réalisés) pour chacune des trois filtrations réalisées à chaque station/date. Les résultats sont présentés dans la Figure 53 où les espèces sont classées proportionnellement à un pourcentage décroissant de réplicas positifs.

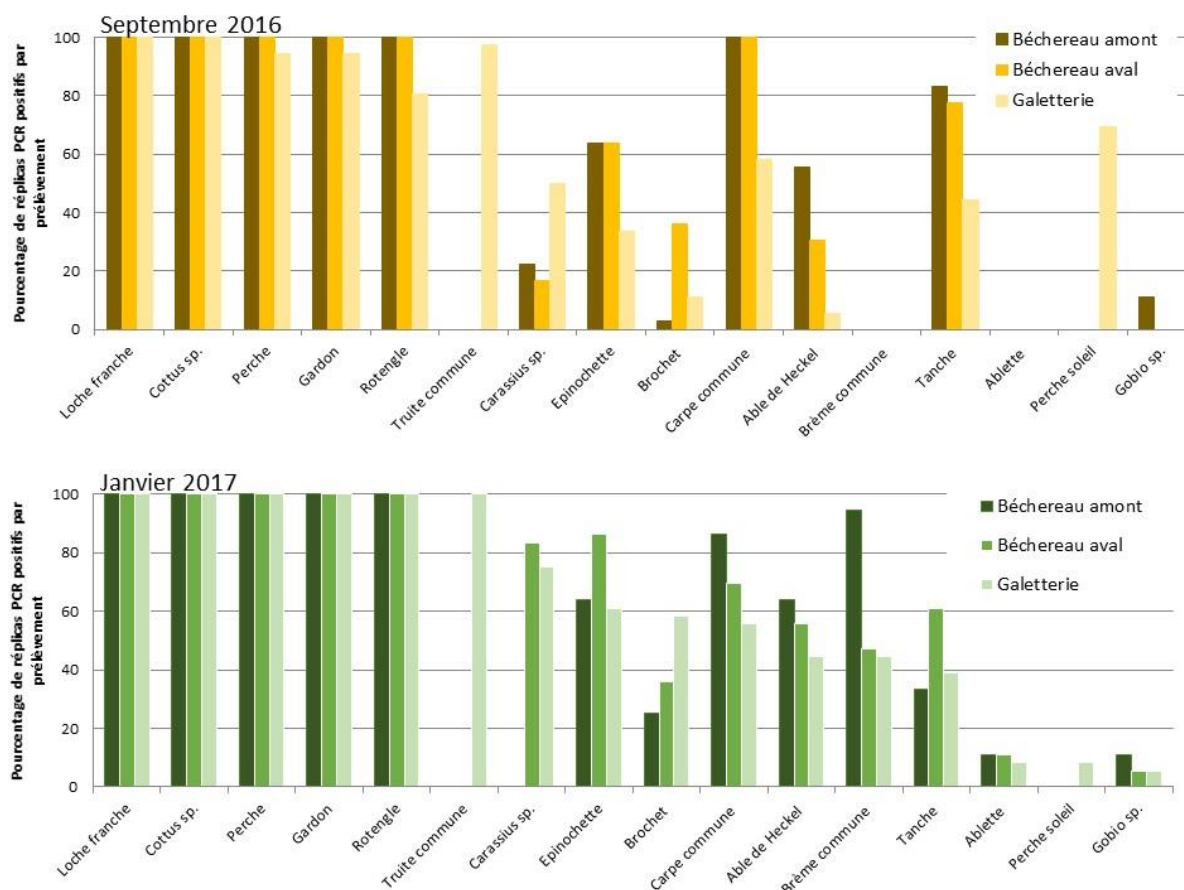


Figure 53. Occurrences de réplicas positifs dans les trois échantillons (filtrations) réalisés à chaque station et aux deux dates de prélèvements.

Globalement, on observe 5 espèces détectées sur tout le linéaire de l'Aulne et aux deux dates avec des pourcentages supérieurs à 80% : la loche franche, le chabot, la perche commune, le gardon et le rotengle. Alors que les deux premières sont les plus courantes dans les pêches électriques (Tableau 9), les trois suivantes sont en général représentées par quelques individus pêchés dans le cours d'eau. Il est probable que ces espèces, présentes dans certains étangs connectés à l'Aulne, apportent une forte proportion de leur ADN au cours d'eau. On notera la détection exclusive de la truite fario à la Galetterie aux deux dates, ce qui est cohérent avec les données de pêches : absence de truite en amont de Béchereau, faible fréquentation du secteur Béchereau aval (Figure 45) alors que de nombreux individus fréquentent l'aval de la Galetterie (données issues de télémétrie au paragraphes suivants).

habituellement peu ou pas capturées par pêches électriques dans le cours d'eau sont détectées par l'ADNe : brochet, épinochette et Able de Heckel. L'Able a été pêché pour la première fois à l'amont du seuil de Béchereau, certainement par l'effet de la crue qui a connecté les étangs au cours d'eau (Tableau 11). Le brochet peu détecté en septembre présente un gradient de détection vers l'aval en janvier, son ADN pouvant provenir des étangs présents en amont de la Galetterie (Figure 51). Enfin, certaines espèces détectées par l'ADNe ne sont pas habituellement pêchées, elles présentent un gradient amont aval du nombre de répliques positifs : la carpe commune, la brème commune, la tanche, l'able de Heckel. Ces espèces d'eau calme sont certainement présentes dans les étangs en amont de Béchereau et compte tenu des faibles débits de cette période, leur signal ADN diminue lorsqu'il s'éloigne de sa source, en raison probablement d'un processus de décantation (Jane et al. 2015).

La richesse spécifique est ensuite estimée en utilisant un seuil de 5% d'occurrence (Tableau 12) comme suggéré par Ficetola et al. (2015). La richesse spécifique augmente vers l'aval, notamment par la détection de la truite et de la perche soleil. Elle est plus élevée en janvier qu'en septembre, notamment par la détection de la brème et l'ablette uniquement à cette date.

Tableau 12 : Richesse spécifique calculée à partir des occurrences positives de tous les répliques). En grisé, les valeurs faibles.

Richesse spécifique (Occurrence sur les 36 répliques par prélèvements)							
Nom scientifique	Nom vernaculaire	sept-16			janv-17		
		Béchereau amont	Béchereau aval	Galetterie	Béchereau amont	Béchereau aval	Galetterie
		Richesse spécifique			Richesse spécifique		
		11	11	13	13	14	16
<i>Abramis brama</i>	Brème commune	0,00	0,00	0,00	94,44	47,22	44,44
<i>Alburnus alburnus</i>	Ablette	0,00	0,00	0,00	11,11	11,11	8,33
<i>Barbatula barbatula</i>	Loche franche	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Carassius sp.</i>	-	22,22	16,67	50,00	0,00	83,33	75,00
<i>Cottus sp.</i>	-	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Cyprinus carpio</i>	Carpe commune	100,00	100,00	58,33	86,11	69,44	55,56
<i>Esox lucius</i>	Brochet	2,78	36,11	11,11	25,00	36,11	58,33
<i>Gobio sp.</i>	-	11,11	0,00	0,00	11,11	5,56	5,56
<i>Lepomis gibbosus</i>	Perche soleil	0,00	0,00	69,44	0,00	0,00	8,33
<i>Leucaspis delineatus</i>	Able de Heckel	55,56	30,56	5,56	63,89	55,56	44,44
<i>Perca fluviatilis</i>	Perche	100,00	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00
<i>Pungitius pungitius</i>	Epinochette	63,89	63,89	33,33	63,89	86,11	61,11
<i>Rutilus rutilus</i>	Gardon	100,00	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00
<i>Salmo trutta</i>	Truite commune	0,00	0,00	97,22	0,00	0,00	100,00
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Rotengle	100,00	100,00	80,56	100,00	100,00	100,00
<i>Tinca tinca</i>	Tanche	83,33	77,78	44,44	33,33	61,11	38,89

Cette richesse est plus élevée que celle obtenue par pêche électrique car elle inclut les espèces présentes dans les étangs connectés à l'Aulne. Les gradients amont aval de diminution des occurrences positives entre les trois stations peuvent sans doute s'expliquer par la présence de ces espèces lenticules dans les divers étangs jalonnant le cours de l'Aulne. En faisant l'hypothèse que certaines espèces ne sont présentes que dans l'étang en amont de Béchereau (carpe, tanche, able de Heckel), leur ADN est encore détectable 3 km en aval.

Si on classe les pourcentages de séquences d'ADN des espèces détectées de chaque station et date par ordre décroissant, on peut avoir une tendance de l'abondance relative des espèces (Figure 54). La loche France et le chabot sont les espèces les plus abondantes, les différences entre l'amont et l'aval ne sont pas très différentes. La prépondérance des loches en amont et des chabots en aval, observée par pêche électrique (Figure 55), cohérente avec les types d'habitats, n'est pas observée à l'aide des pourcentages de séquences d'ADN.

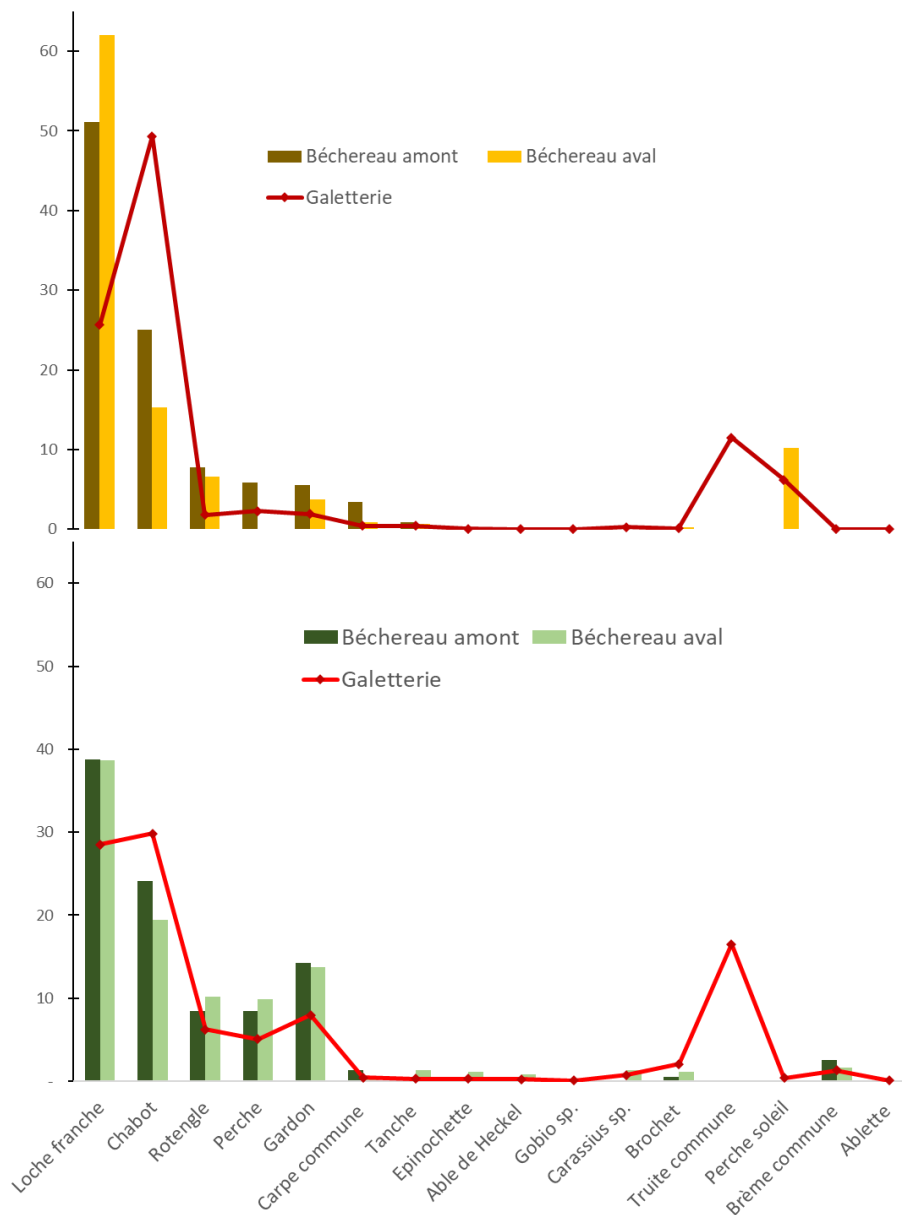


Figure 54. Pourcentage de séquences d'ADNe moyen par station et date : en haut, septembre 2016 et en bas janvier 2017.

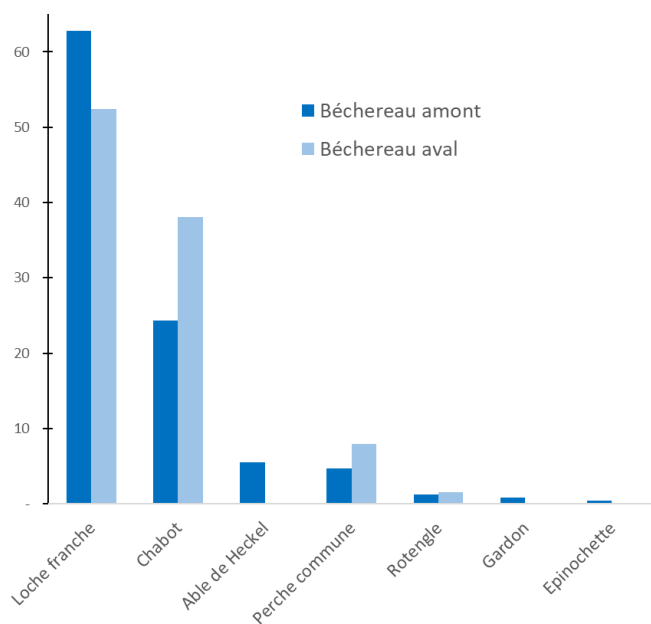


Figure 55. Abondance relative (pourcentage) des effectifs estimés par pêche électrique à deux passages (13 octobre 2016, Tableau).

Le nombre d'espèces recensées par metabarcoding aux trois stations réparties sur 3 km de l'Aulne s'avère supérieur à celui recensé par pêche électrique quelle que soit la stratégie d'échantillonnage adoptée (échantillonnage ponctuel EPA ou pêche en continu classique) et augmente vers l'aval. Cependant, les différences sont principalement liées aux espèces peu abondantes ou inféodées aux étangs. Wilcox et al. (2016) ont déjà montré que la prédiction de détection d'une espèce est plus forte pour l'ADNe que pour les pêches électriques lorsque l'abondance est faible (<5 individus). Des différences entre les échantillonnages de l'automne et de l'hiver sont observées mais peu interprétables, les facteurs débits et température influençant la richesse saisonnière sont discutés plus précisément dans l'étude sur l'Orgeval (Tallec et al., 2018).

Les résultats nous montrent que le metabarcoding est avant tout un outil intégratif. Comme cela a été observé par (Tallec et al., 2018) la mesure du signal ADNe à une station semble plutôt fournir un inventaire de la biodiversité piscicole présente sur l'amont du bassin versant drainé plutôt qu'un recensement de la diversité locale, contrairement aux échantillons par pêche électrique. Cependant l'emprise spatiale de cette intégration du signal ADNe reste encore à clarifier. Quelques éléments semblent se dégager de nos résultats, en lien avec les espèces inféodées aux étangs et dont le signal ADNe diminue lorsqu'on s'éloigne vers la station de prélèvement la plus aval (cas des étangs en amont des trois stations) ou qui apparaît (cas des espèces présentes dans les étangs intermédiaires). Certaines études ont montré que les distances de détection d'ADNe depuis sa source sont très variables, allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres (Jane et al., 2015 ; Civade et al., 2016 ; Shogren et al., 2017).

8. Etude des déplacements de truite avant restauration

8.1. Marquage des truites et protocoles de suivi

8.1.1. Choix des émetteurs utilisés

Il existe plusieurs types d'émetteurs (externes, internes à antenne externe, interne à antenne encapsulée...), Pour cette étude nous avons opté pour des émetteurs internes à antenne encapsulée, En effet, les cours d'eau étudiés étant des têtes de bassin de faible profondeur et présentant de nombreux embâcles, racines et branchages, il était préférable de ne rien laisser dépasser de l'animal afin d'éviter toute blessure et perte d'émetteur.

Le poids des émetteurs ne devant pas dépasser 2% du poids total de l'individu, trois poids d'émetteurs ont été utilisés :

1,7 g pour des poissons compris entre 85 et 127 g

2,5 g pour des poissons compris entre 128 et 200 g

4 g pour des poissons supérieurs à 200 g

Pour chaque poids correspond une durée d'émission, Ainsi les marques de 1,7g émettent pendant 58 jours, celles de 2,5 g pendant 158 jours et celles de 4 g pendant 441 jours (durées théoriques indiquées par le fabricant).

8.1.2. Marquage des truites.

La capture des individus en vue de leur marquage se fait par pêche électrique. Les coordonnées GPS du lieu de capture des poissons sont notées. Une fois pêché, chaque poisson est transporté sur le lieu de chirurgie/marquage. L'anesthésie s'effectue dans un bac contenant une solution d'eugénol en solution à 10% dans l'alcool à dose de 4 ml de solution pour 10 litres d'eau. Lorsque l'animal est endormi il est pesé et mesuré. Un échantillon de nageoire et quelques écailles sont récoltés afin de réaliser ultérieurement des analyses génétiques et de déterminer l'âge de l'individu. Ce dernier est ensuite placé dans un bain de sédation oxygéné (concentration d'eugénol 10% : dose de 1 ml de solution pour 10 litres), une petite entaille est pratiquée entre les deux nageoires pelviennes de la truite afin de déposer l'émetteur dans la cavité péritonéale (*Figure 56*). La plaie est ensuite recousue et l'animal reçoit une dose d'antibiotique pour limiter le risque d'infection. Le réveil s'effectue dans un vivier positionné dans la rivière. Les poissons sont ensuite relâchés sur le lieu de marquage (un lieu unique de lâcher par cours d'eau, différent des lieux de capture des individus). Le temps d'anesthésie, c'est-à-dire entre le moment où le poisson est plongé dans le bac d'anesthésie et le moment où il est transféré vers le site de réveil, a été de 8 à 10 minutes. Il a fallu environ 3 minutes aux individus pour se réveiller de l'anesthésie.



Figure 56 – Illustration du protocole de chirurgie : insertion des émetteurs dans la cavité péritonéale à gauche et émetteurs à antenne encapsulée de 2,5 et 4 gr à droite.

Sur l'Aulne, les sessions de marquage ont eu lieu le 13 mars et le 3 avril 2012, 16 truites ont été marquées, 4 avec des émetteurs de 1,7 g ; 5 avec des 2,5 g et 7 avec des 4 g.

Sur la Mérantaise les marquages ont eu lieu le 16 mars et le 5 avril 2012, 23 truites ont été marquées, 6 avec des émetteurs de 1,7 g ; 9 avec des 2,5 g et 8 avec des 4 gr.

Sur la Mérantaise, 4 truites ont été retrouvées mortes le lendemain du marquage et 4 n'ont plus été localisées par la suite. Sur l'Aulne, seule une truite n'a pas été retrouvée.

8.1.3. Protocole de suivi des déplacements

Les émetteurs insérés dans l'animal émettent une onde de fréquence connue et unique à chaque individu. Des récepteurs de marque ATS (Advanced Telemetry System) permettent de capter ces ondes et ainsi localiser avec précision le poisson. A ces récepteurs, il peut être branchée une antenne boucle (pour un suivi manuel mobile) ou une antenne filaire à positionner dans le cours d'eau (pour un suivi fixe). Dans les deux cas, les récepteurs enregistrent une force de signal qui renseigne la localisation du poisson. Plus le poisson se trouve proche de l'antenne boucle ou de l'extrémité du fil, plus la force du signal est élevée, Les forces de signal vont de 88 à 155.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs suivis ont été mis en place :

- Un suivi fixe : des récepteurs ont été installés au niveau du moulin d'Ors et des Ponts de pierre sur la Mérantaise et au niveau des moulins de Béchereau et de la Galetterie sur l'Aulne afin de capter les poissons se présentant devant l'obstacle ou le franchissant. Le rayon d'action des récepteurs est de 15-20 mètres selon la morphologie du cours d'eau. Ils ont fonctionné du 9 mars 2012 (28 mars pour le récepteur des ponts de pierre) au 24 avril 2013. Un boîtier a également été installé du 16 novembre 2012 au 26 mars 2013 au niveau du village de Bullion sur l'Aulne. Il a permis d'affiner les trajectoires de certains individus lors de la période de reproduction. (Figure 59).



Figure 57 – Coffret fixe de détection et d'enregistrement comprenant le boîtier récepteur ATS et une batterie d'alimentation. Une antenne filaire sort du coffret et son extrémité est plongée dans le cours d'eau.

- Un suivi manuel réalisé une fois par semaine. Il s'agit ici de localiser chaque poisson à l'aide d'une l'antenne boucle reliée à un récepteur portatif (*Figure 58*). La précision de localisation peut aller jusqu'au mètre près.



Figure 58 – Matériel utilisé pour le suivi manuel : boîtier de détection portatif et antenne boucle.

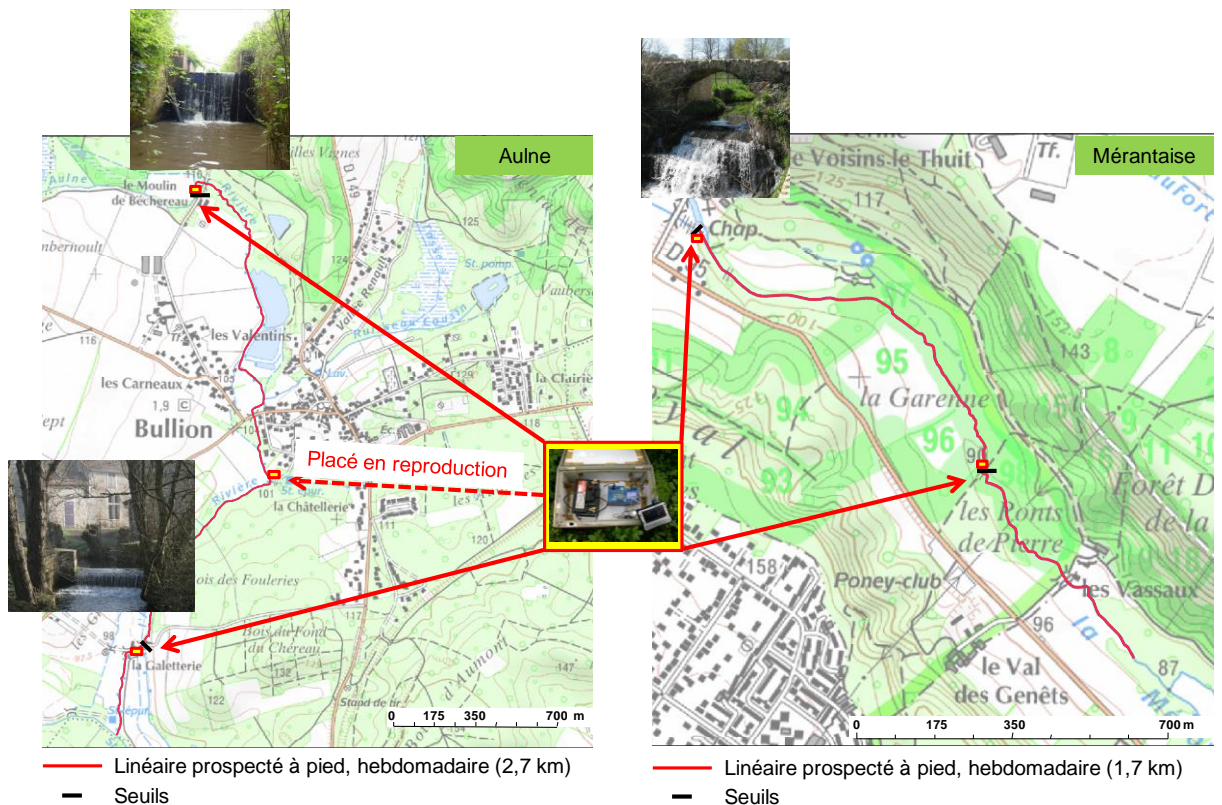


Figure 59 – Position des boîtiers fixes et linéaire prospecté manuellement.

8.1.4. Analyse des données de mouvements : caractérisation des trajectoires

Pour chaque individu, nous disposons d'une localisation hebdomadaire et certains possèdent des données supplémentaires issues des enregistreurs fixes. L'objectif ici est d'utiliser ces deux sources de données pour tracer la trajectoire effectuée par le poisson lors de la période de suivi. Le logiciel Anaqualand 2.0 (Baudry, 2005) permet de calculer des distances hydrographiques, c'est-à-dire la distance entre deux points en suivant le réseau hydrographique (et non une distance euclidienne qui n'a aucun sens biologique dans cette étude).

La *Figure 60* illustre les mouvements effectués par un poisson depuis le jour et le lieu de lâcher. Sur le graphe de trajectoire, les valeurs positives symbolisent des mouvements vers l'amont du lieu de lâcher et celles négatives, des mouvements effectués à l'aval du lieu de lâcher.

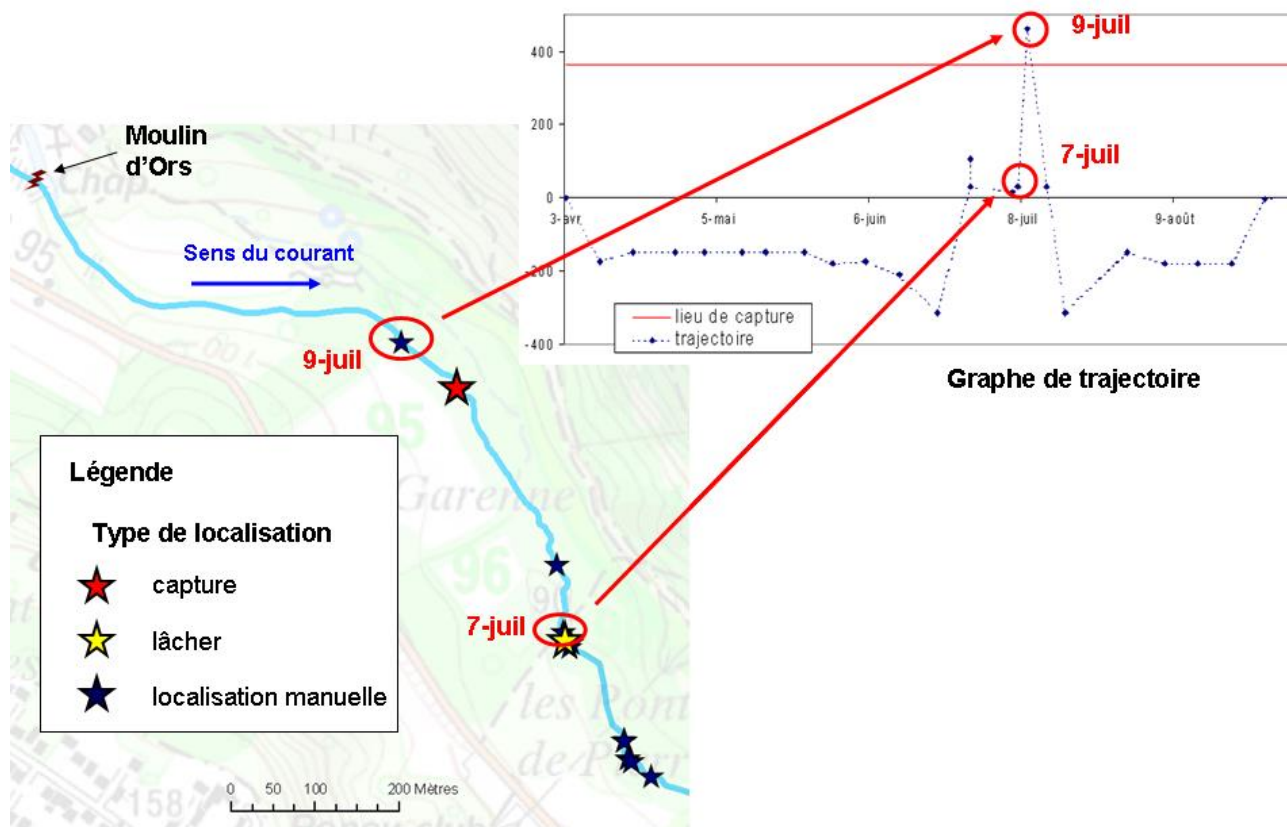


Figure 60 – Localisation spatiale hebdomadaire et graphe de trajectoire correspondant.

8.2. Résultats du suivi des déplacements de truite

8.2.1. Caractéristiques générales des individus échantillonnés pour cette étude

Lors du marquage, les individus pêchés ont été mesurés, pesés et des prélèvements d'écaillés et de nageoires ont été réalisés. Il a ainsi été possible de déterminer l'âge des truites étudiés et leurs origines génétiques (issues de pisciculture ou de souche sauvage).

- Poids et taille des individus étudiés

La taille a été mesurée du bout de la queue à l'extrémité de la bouche. Un résumé de ces résultats est présenté Tableau 13.

Tableau 13 : Poids et taille des truites échantillonnées pour l'étude des mouvements.

	poids (g)		taille (mm)	
	Aulne	Mérantaise	Aulne	Mérantaise
moyenne	560	324	347	283
écart type	432	378	105	97

médiane	529	196	363	247
min	82	70	190	178
max	1724	1562	554	506

Les truites échantillonnées semblent avoir des poids et taille légèrement supérieurs sur l'Aulne. Pourtant seule une différence significative est observée sur le poids (Approximative Wilcoxon Mann-Whitney Rank Sum Test : p-value = 0,0238).

Au regard du peu d'individu prélevés, il n'est pas possible ici de déterminer si ces différences trouvent une explication écologique et/ou anthropique (nourriture plus abondante sur l'Aulne, pêche moins importante...) ou si elles sont dues au hasard d'échantillonnage.

- Age des truites échantillonnées

La lecture des stries de croissance sur les écailles prélevées de 39 individus a été réalisée grâce à l'aide de Christine Gazeau (IRSTEA, Bordeaux) et Mathieu Girondin pour la préparation des lames et à celle de Jean-Luc Baglinière (INRA Rennes) pour la détermination des âges et des marques de reproduction. Une partie des individus possédaient des écailles régénérées dont la lecture n'était pas possible. 23 individus sur 39 ont pu être âgés et 10 montrent des marques de reproduction.

La lecture d'écaille des truites étudiées ici fait apparaître une forte croissance de l'ensemble des individus. La croissance des truites dépend de la nature géologique du bassin versant, du régime thermique du cours d'eau (l'optimum de croissance est situé entre 7 et 19°C selon les populations), de la disponibilité en nourriture et du sexe du poisson. De telles croissances sont généralement observées sur des cours d'eau calcaire, assez tamponnés thermiquement. Le substrat est ici constitué principalement des sables de Fontainebleau, mais le régime thermique est sans doute très favorable avec une saison de croissance assez longue. Il est aussi probable qu'une légère charge en matière organique, lié aux rejets anthropiques, soit aussi favorable à la croissance.

Les truites qui rentrent dans leur deuxième année (individus 1 et 1+) mesurent en moyenne 200,6 mm ; deux ans plus tard cette moyenne atteint 350 mm. Sur les 10 individus pour lesquels il a été possible d'identifier les marques de reproduction, 8 montrent une reproduction dès l'âge de 2 ans et deux, à partir de 3 ans. Ces individus se sont reproduits au moins 2 fois. Les écailles de la truite n°39 (936 g et 444 mm) possèdent au moins 3 marques de reproduction. La Figure 61 expose la taille des individus en fonction de leur âge. On remarque une augmentation rapide de la taille entre 1 et 3 ans. L'arrêt de croissance observé entre les âges 3 et 4 est sûrement imputable aux faibles effectifs de l'échantillon à ces âges.

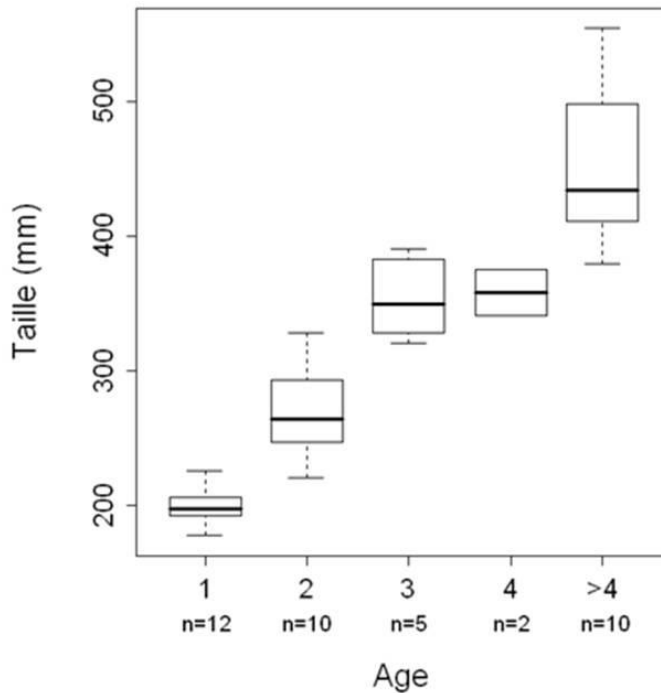


Figure 61 – Relation entre taille et âge des individus

- Analyse génétique

L'étude des déplacements faisant intervenir une notion de comportement des individus, il était important de connaître les caractéristiques génétiques des truites étudiées et de mettre en évidence d'éventuels croisements avec des souches issues de pisciculture. L'Aulne et la Mérantaise semblent ne pas avoir connu de repeuplement récent mais l'existence de nombreux étangs et quelques pêcheurs pourraient expliquer la présence de truites domestiques dans ces cours d'eau.

L'analyse s'est faite sur les microsatellites au niveau de 12 marqueurs. Les microsatellites sont des séquences d'ADN nucléaire, composées de motifs répétés en tandem de 1 à 6 nucléotides (Toth et al., 2000). Ces microsatellites sont très abondants dans le génome et présentent un haut niveau de variabilité en raison d'un taux de mutation élevé. Ils permettent ainsi d'analyser de façon très fine la diversité intra et inter populations (Tautz et al., 1989), de détecter et résoudre des problèmes écologiques liés à la fragmentation d'habitat et les flux de gènes (Rodriguez et al., 2000) et de façon plus générale de retracer l'histoire récente des populations.

L'analyse génétique consiste à extraire de l'ADN issu d'un échantillon de nageoire, à l'amplifier par PCR pour ensuite génotyper les microsatellites. Ce travail a été effectué par le laboratoire Génindexe sur 23 truites de la Mérantaise, 16 de l'Aulne et 6 truites issues de deux piscicultures. L'analyse consiste ensuite à comparer les génotypes des truites témoins, c'est-à-dire celles dont l'origine domestique est connue (ici les 6 truites de pisciculture) à celles des cours d'eau du Parc. L'interprétation des résultats, réalisée par M. Berrebi, Directeur de recherche au CNRS, passe par une analyse d'assignation qui évalue la probabilité de chaque

individu d'appartenir à une entité génétique distincte. Les pourcentages d'appartenance de chaque individu à ces entités sont décrits en Annexe 4.

Les résultats de l'analyse d'assignation, réalisée à partir du logiciel STRUCTURE, sont présentés Figure 62.

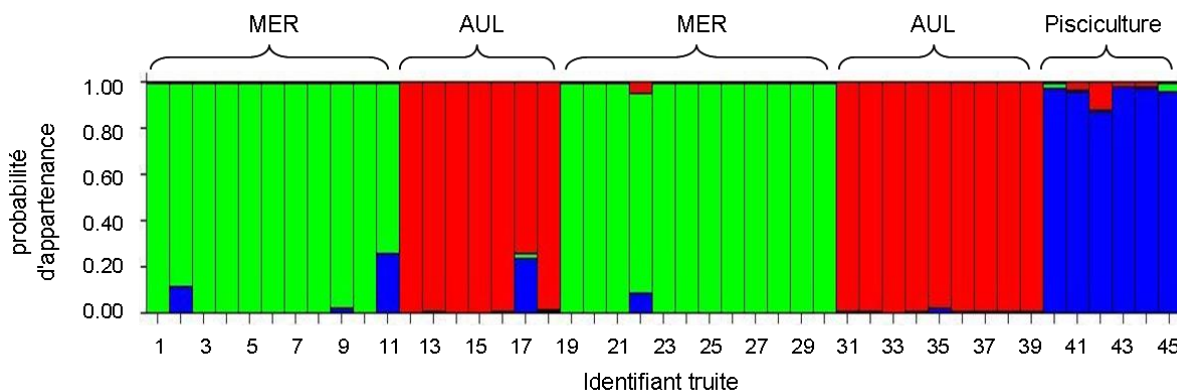


Figure 62 – Résultats de l'analyse d'assignation (MER : Mérantaise, AUL : Aulne)

Cette analyse montre clairement 3 entités génétiques différentes : les truites représentées en vert dans l'analyse (1 à 11 et 19 à 30) diffèrent de celles "en rouge" (12 à 18 et 31 à 39) qui toutes diffèrent de celles "en bleu" (40 à 45). Après recherche de la localisation géographique, il apparaît que les individus assignés dans l'entité "verte" sont tous issus de la Mérantaise, ceux en rouge de l'Aulne et ceux en bleu des piscicultures. On constate cependant que certaines truites du PNR portent des marques d'hybridation avec des truites domestiques (marques bleues). Ainsi les individus 11 et 17 possèdent environ 25 % de gènes domestiques et les truites 2 et 22 respectivement 11,7 et 8,9% (Annexe 4). Les probabilités d'appartenance inférieures à 5% sont considérées comme "bruit de fond" et n'ont donc aucune réalité biologique.

Ces résultats permettent de proposer l'histoire évolutive suivante :

Après le dernier réchauffement glaciaire (- 15 000 ans) et compte tenu, aussi bien pour l'Aulne que pour la Mérantaise, de leur proximité avec la Seine, ces deux rivières ont probablement été peuplées par la même lignée de truite. L'absence de migration d'individu a ensuite engendré une dérive génétique neutre. On appelle dérive génétique neutre une différenciation génétique s'opérant sur des allèles neutres et qui ne confère aucun avantage ni désavantage à l'individu. Il est en effet très fréquent que les truites soient sédentaires au point d'accumuler de la différence génétique neutre vis à vis de populations pourtant très voisines géographiquement. L'adaptation, et donc la différenciation génétique, peut se faire en seulement quelques générations, en raison de variations infimes de caractéristiques des rivières : différence de nourriture, température, débit, régime annuel...

En ce qui concerne les quelques poissons "introgressés", leur génétique reste "celle de leur rivière" mais leur histoire diffère des autres individus. On peut invoquer deux hypothèses :

- L'introgression est récente (5 ans maximum) : dans ce cas là on peut invoquer le phénomène de "backcross", c'est-à-dire croisement de truite sauvage avec des truites domestiques donnant la première génération (50% de chaque origine) puis croisement avec la truite sauvage plus fréquente (75% sauvage-25% domestique). La participation à la reproduction des

truites domestiques reste très marginale en raison du faible taux de survie en milieu naturel des truites issues de pisciculture.

- L'introgression est plus ancienne : dans ce cas-là il y aurait là aussi croisement entre des truites sauvages et domestiques puis dilution des gènes domestiques au fil des générations. Les truites domestiques ont des caractéristiques légèrement défavorisantes car moins bien adaptées au milieu naturel que les truites sauvages ce qui expliquerait que leurs allèles se perdent entre les générations.

Dans les deux cas et sur les deux cours d'eau, l'introgression par des souches domestiques reste négligeable. Les comportements observés seront donc des comportements "sauvages" et une attention particulière sera portée aux résultats des déplacements des truites 11, 17 et 22 (la truite 2 étant morte suite au marquage).

8.2.2. Mouvements effectués par les truites sur l'Aulne et la Mérantaise

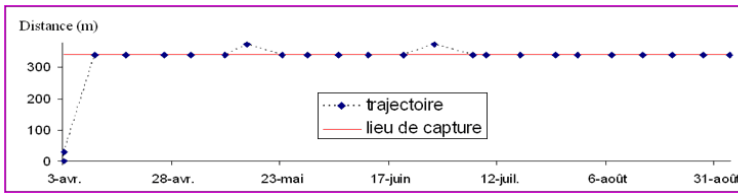
Une sélection préalable a été effectuée sur le jeu de données. Sur les 39 individus marqués, 9 ont disparu suite au marquage (8 sur la Mérantaise et 1 sur l'Aulne). Pour la suite de l'étude seulement les individus présentant au moins un déplacement de plus de 20 m et suivis pendant au moins un mois ont été gardés. Les individus 31 et 34 sont restés durant toute la période du suivi sur le lieu de lâcher et le 32 n'a montré que de rares mouvements <20m. Les individus 19 et 30 n'ont plus été entendus à partir de la deuxième semaine du suivi. Ces 5 individus ont donc été exclus de l'analyse des mouvements. L'étude porte donc sur 25 individus, 12 sur l'Aulne et 13 sur la Mérantaise, le bilan des individus marqués et suivis est présenté en Annexe 5.

8.2.3. Types de comportements observés

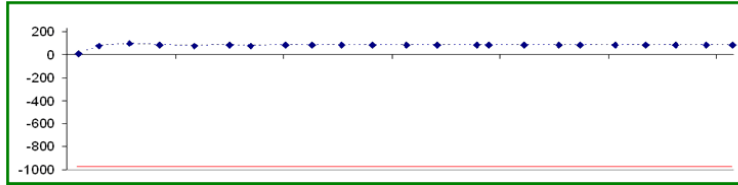
Comportements généraux

Parmi les 25 individus suivis, on peut constater trois comportements distincts, hors période de reproduction (Figure 63) :

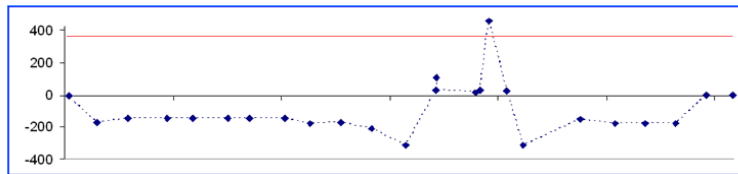
- les truites qui regagnent leur lieu de capture (=phénomène de homing) et s'y sédentarisent : 11 individus
- les truites qui ne regagnent pas leur lieu de capture mais se sédentarisent sur un site : 8 individus
- les truites qui ne regagnent pas leur lieu de capture et adoptent une tactique d'exploration (plusieurs mouvements supérieurs à 50 mètres) : 6 individus.



➤ Homing
(truite 22)



➤ sédentarisation
(truite 33)



➤ Tactique
d'exploration
(truite 23)

Figure 63 – Types de comportements observés chez l'ensemble des truites suivis par télémétrie radio.

Comportement de sédentarisation

Pour illustrer le comportement sédentaire, il est présenté ci-après les résultats des enregistrements de la truite 29 par le boîtier fixe du seuil d'Ors.

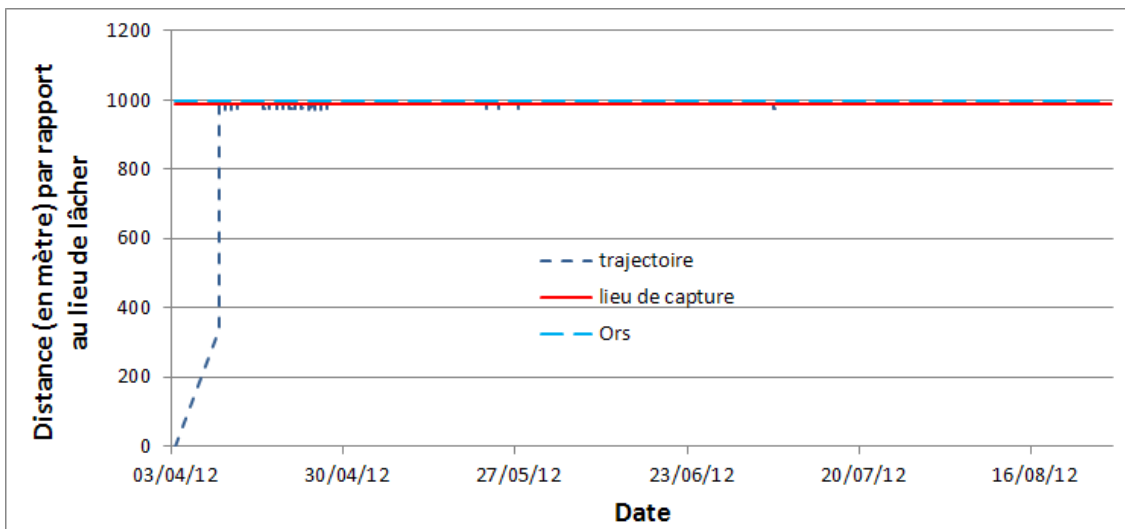


Figure 64 – Graphe de trajectoire de la truite 29, capturée sous la chute du seuil d'Ors.

La truite 29 a été capturée sous la chute du seuil d'Ors, puis relâchée aux Ponts de Pierre (1 km en aval, voir Figure 7). En 7 jours, elle retourne sur son gîte principal sous la chute du seuil d'Ors (Figure 64). Grâce au boîtier fixe positionné à cet emplacement, il a été possible de capter les moindres mouvements de cette truite depuis son arrivée sur son lieu de capture jusqu'à la fin de vie de son émetteur.

Les résultats de ces enregistrements sont présentés Figure 65 avec en abscisse les jours et en ordonnées les forces de signaux. En effet, l'appareil enregistre non seulement la présence de l'émetteur mais renseigne aussi la force de l'émission, et donc par extrapolation la distance qui sépare le poisson du boîtier fixe. Une calibration a été effectuée afin de corréliser les forces de signal captées à une localisation de l'animal par rapport à la position de l'antenne filaire. Par exemple, une force de signal comprise entre 145 et 155 signifie que la truite se trouve sous la chute du moulin d'Ors (car l'antenne filaire est dans la fosse au pied de la chute). Lorsque la force de signal est aux alentours de 110, la truite se situe à 15 m à l'aval de l'antenne. La limite de détection est ici d'environ 25 m à l'aval et en théorie quelques mètres à l'amont de l'obstacle (Figure 65).

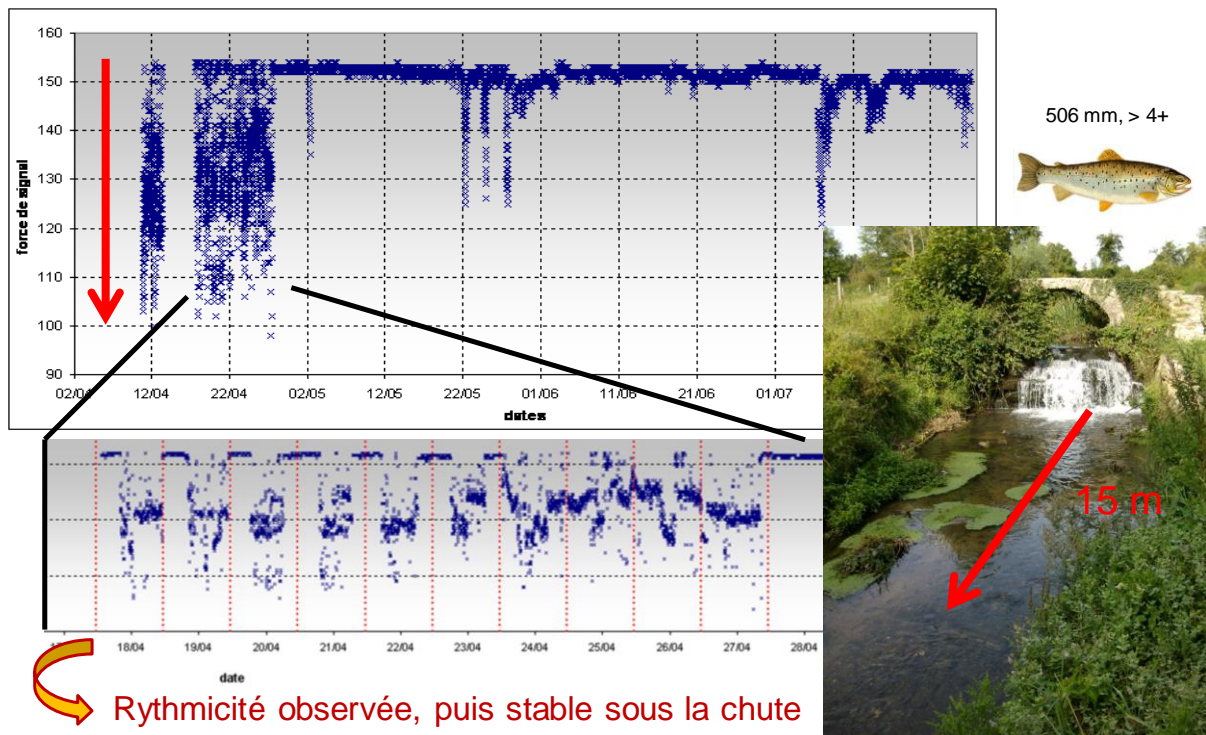


Figure 65 – Forces de signal enregistrées par le boîtier fixe situé sous la chute du seuil d'Ors – truite 29. Zoom sur les forces de signal enregistrées par le boîtier fixe d'Ors entre le 10/04/2012 et le 27/04/2012 pour la truite 29 (les pointillés rouge marquent l'horaire 12h de chaque jour).

Le premier enregistrement a lieu le 10 avril 2012 à 21h54 (Figure 65). On observe une phase de mouvements très fréquents pendant 17 jours puis une sédentarisation marquée, ponctuée par de rares mouvements vers l'aval. En effet, les 2, 22, 24, 27 mai et le 6 juillet, les forces de signal diminuent indiquant un déplacement de la truite de quelques mètres vers l'aval (< 15 m). L'absence d'enregistrement entre le 13/04/2012 et le 17/04/2012 est due à un problème technique d'alimentation du boîtier. Jusqu'au 27 avril cette truite marque un comportement cyclique alternant une phase de "repos" en journée sous le boîtier (signal aux alentours de 150) et une phase de "déplacements" nocturnes et matinaux entre 5 et 20 m à l'aval du boîtier. A partir du 27 avril elle cesse ce cycle quotidien et rejoint son gîte préférentiel (sous le seuil).

Nombre de gite préférentiel

Un gite est considéré comme préférentiel lorsque l'individu est localisé au même endroit par au moins 3 localisations manuelles. La plupart des individus ont entre 1 et 2 gites préférentiels. Seulement 3 truites semblent posséder de 3 à 5 gites. 9 truites ont pu être suivies après la période de reproduction. On constate que 7 d'entre elles retrouvent leurs gites préférentiels après la reproduction. Les truites 15 et 16 s'installent sur un nouveau gite après la période de reproduction.

La truite 16 par exemple (Figure 66), quitte son deuxième gite préférentiel début octobre 2012, ce qui peut coïncider avec un début de migration de reproduction. Mi-octobre, on observe une élévation du niveau d'eau (du niveau de base de 10 cm à 25 cm) qui correspondrait au mouvement vers l'amont observé sur la trajectoire. Cet individu dévale ensuite le cours d'eau jusqu'au seuil de la Galetterie le 3 novembre sans que les niveaux d'eau soient élevés. Après plusieurs jours passés au pied de la chute du seuil de la Galetterie (enregistrement en continu de signaux au boîtier fixe, Figure 50), elle se sédentarise sur un nouveau gite à 74 m à l'aval de la Galetterie à partir du 13 novembre 2012.

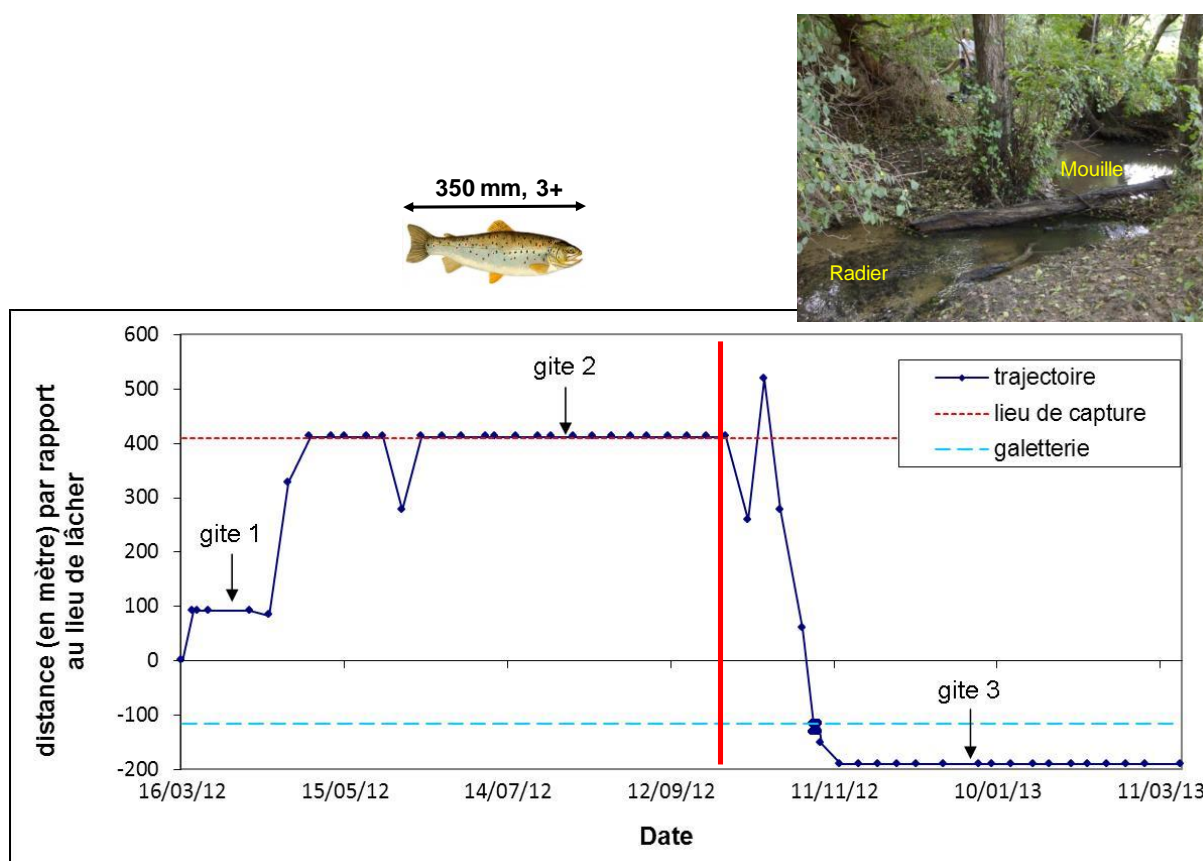


Figure 66 – Trajectoire et gites préférentiels de la truite 16.

8.2.4. Etude des comportements suite au marquage

Comportement post marquage

Afin d'étudier les déplacements et comportements liés au marquage, une période dite "post marquage" (ou PM) a été déterminée pour chaque poisson. Elle correspond au temps entre le jour du lâcher et le jour où le poisson effectue un mouvement supérieur à 20 m.

Bien qu'un mouvement de 20 m n'illustre pas forcément une fin systématique d'influence du marquage, il montre néanmoins que l'individu est rétabli des suites de l'opération chirurgicale et est capable de se déplacer.

En moyenne, les comportements semblent être influencés par le marquage pendant 7,79 jours (SD=10,92 ; min=0,11 ; médiane=5,19 ; max=43,76). Durant cette période les individus parcourent en moyenne 111,57 m (SD=94,15 ; min=29,18 ; médiane=111,70 ; max=352,75). Ces déplacements sont effectués uniquement vers l'amont par 17 poissons, uniquement vers l'aval par 7 individus et un seul montre des déplacements amont et aval.

Aucune différence de distance post marquage n'est observée entre les deux cours d'eau ($p=0,2641$), en revanche il semblerait que la période post marquage soit significativement plus importante sur la Mérantaise que sur l'Aulne ($p=0,0177$). Ceci pourrait provenir des difficultés rencontrées sur la Mérantaise lors du marquage, qui se sont traduites par une mortalité post marquage plus importante que sur l'Aulne. Ainsi, les poissons de la Mérantaise ont probablement un temps de récupération plus long sur ce cours d'eau.

Une autre explication pourrait provenir de la taille des individus marqués sur la Mérantaise. Nous avons isolé deux classes de taille sur la Mérantaise : l'une comprenant les individus de taille inférieure à 268 mm, qui correspond aux individus non matures et une autre supérieure à 268 mm. En effet, sur ces cours d'eau les individus sont matures dès la deuxième année (marque de reproduction observée sur les écailles), et la taille moyenne des individus âgés de 2 ans et 2+ est de 268 mm.

Bien que la différence ne soit pas significative au sens statistique (Approximative Wilcoxon Mann-Whitney Rank Sum Test, p -value = 0,0653), on remarque que les individus de taille <268 mm ont des durées PM plus importantes que ceux de taille supérieure (Figure 67). Il se pourrait alors que la taille vienne également expliquer le temps de récupération PM plus long observé sur la Mérantaise.

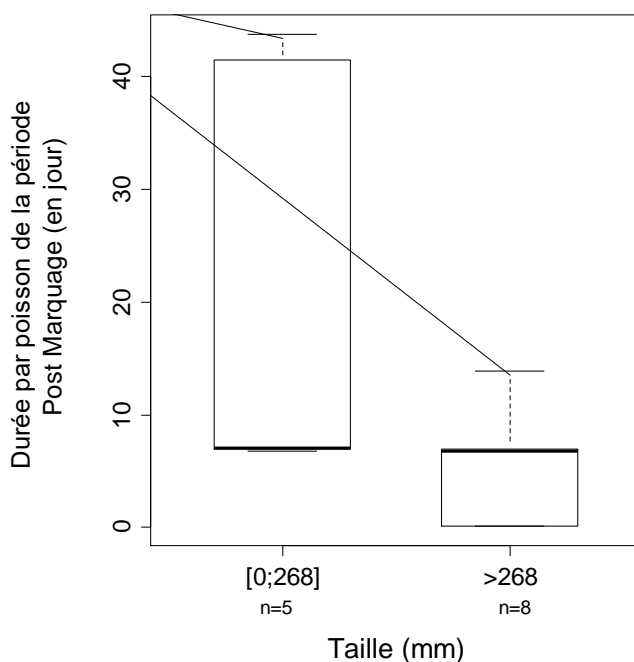


Figure 67 – Durée post marquage en fonction de la taille des individus sur la Mérantaise.

Comportement de homing

Comme les truites ont été relâchées sur le lieu de marquage et non sur le lieu de capture, il a été possible d'étudier l'éventuel retour sur le lieu de capture (appelé Homing).

Sur les 25 truites étudiées ici, 11 ont montré un retour fidèle au lieu de capture (Tableau 14).

Tableau 14 – Mouvements effectués lors du Homing

	ID poisson	Poids (gr)	Taille (mm)	Distance entre le lieu de lâcher et le lieu de capture (en m)	Somme des distances parcourues avant de regagner le lieu de capture (en m)	Temps mis pour retrouver le lieu de capture (en jour)
Poissons lâchés à l'aval du lieu de capture	12	406	329	38	38	3,9
	14	418	342	80	91	3,9
	16	506	350	411	429	46,8
	20	94	200	287	364	49,9
	22	482	380	341	340	6,8
	24	246	293	339	580	63,0
	26	560	391	438	440	6,8
	29	156	506	987	987	7,2
	39	936	444	483	483	5,4
Poissons lâchés à l'amont du lieu de capture	37	552	376	355	437	11,8
	38	262	287	353	353	5,0

En moyenne le temps de retour au lieu de capture est de 19,12 jours (SD=22,33 ; min=3,86 ; médiane=6,78 ; max=62,96) ; 54,5% des individus rejoignent leur lieu de capture en moins d'une semaine.

Certains temps de retour vers le lieu de capture peuvent s'expliquer par les conditions du milieu. Par exemple l'individu 16 est resté bloqué par un embâcle pendant presque un mois avant de continuer sa montaison pour retourner précisément à son lieu de capture.

Pendant cette période les poissons effectuent en moyenne 412,95 mètres (SD=248,79 ; min=38,09 ; médiane=428,92 ; max=986,73). On remarque que 8 d'entre eux regagnent directement leur lieu de capture (moins de 20m d'aller-retour, de prospection...). Seuls 3 individus (20, 24 et 37) ne rejoignent pas leur lieu de capture de façon linéaire. Ces temps et distances ne semblent pas dépendre de la taille des individus.

Sur l'ensemble des poissons étudiés dans cette étude (soit 25 poissons), on note que 50% de ceux relâchés à l'aval de leur lieu de capture retournent sur ce lieu (9 poissons sur 18) et seulement 28,57% pour ceux relâchés à l'amont (2 poissons sur 7).

8.2.5. Comportements par rapport aux obstacles présents sur le secteur

Durant cette étude il a été possible d'étudier les comportements de quelques individus face aux obstacles d'origine anthropique (seuil) et naturel (embâcle).

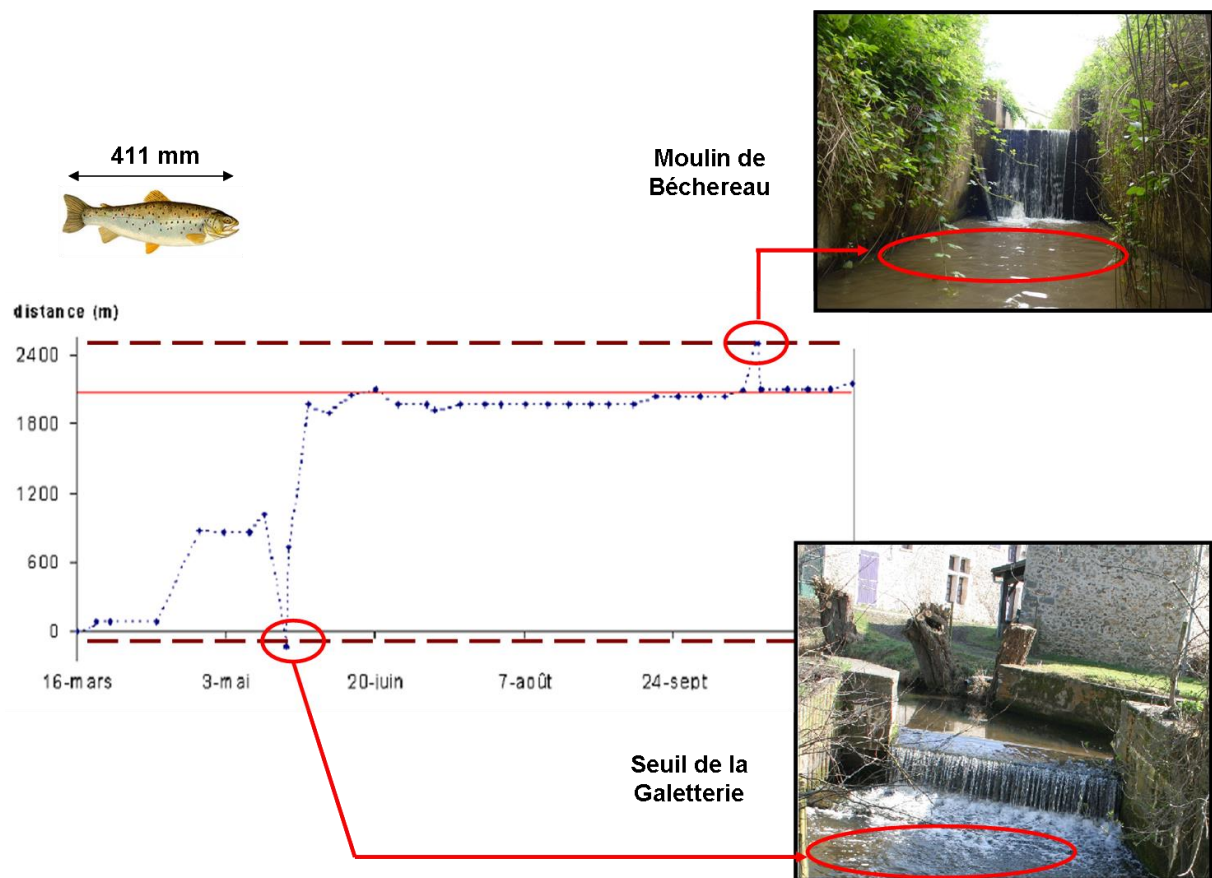


Figure 68 – Graphe de trajectoire de la truite 18. Lieu de capture en rouge, position des seuils en pointillés marron.

L'individu 18 a été capturé 300 m en aval du seuil de Béchereau et relâché en amont du seuil de la Galetterie. Il effectue une dévalaison mi-mai sous la chute de la Galetterie, puis franchit ce seuil à la faveur d'une montée des eaux. Il s'est écoulé 15h entre le moment où cet individu se trouve à l'aval du seuil et le moment où il le franchit. Les enregistrements du boîtier indiquent que l'individu se serait présenté à 4 reprises devant l'obstacle avant de le franchir.

En octobre, cet individu effectue une exploration plus amont et est détecté sous la chute de Béchereau ; n'ayant pu franchir la chute, il redescend sur son lieu de capture. Cet individu de grande taille a eu semble-t-il la capacité de franchir le seuil de la Galetterie (65 cm de hauteur de chute mais avec un pied de chute sur une dalle de béton), lors d'une montée des eaux (niveau d'eau le jour du franchissement : 17,2 cm ; le niveau d'eau médian sur ce cours d'eau est de 11,3 cm).

Nous avons pu aussi étudier le comportement de certains individus face à une large zone d'embâcle constituant un obstacle, située 100 m en amont du lieu de lâcher. Suite au lâcher post marquage, 4 individus se sont retrouvés à l'aval de cet embâcle (Figure 69).

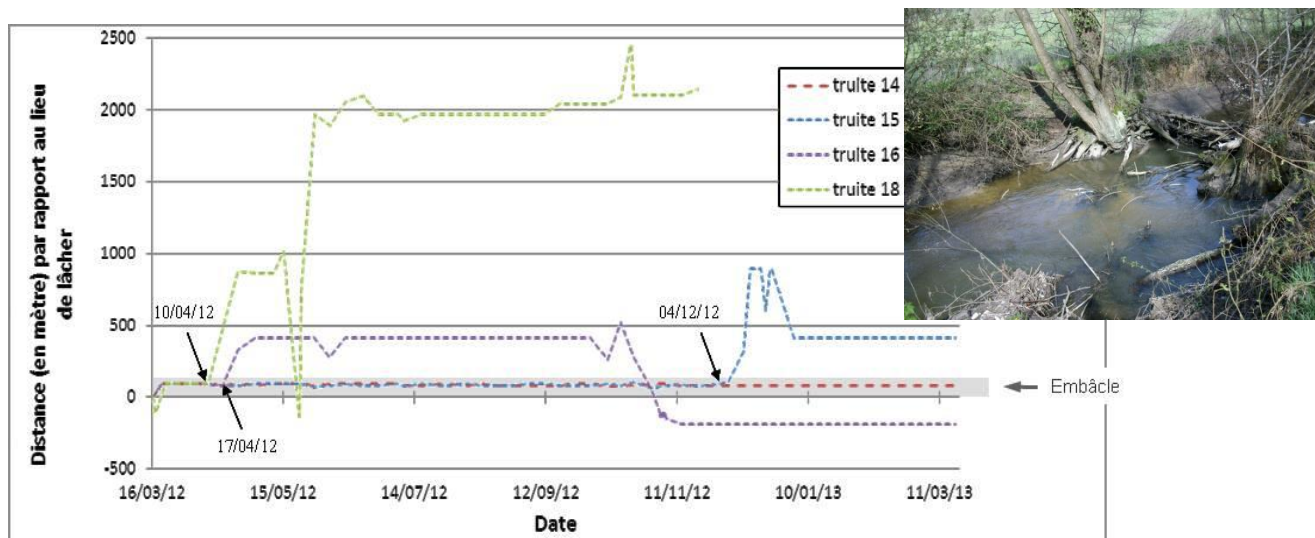


Figure 69 – Graphe de trajectoire des truites 14, 15, 16 et 18 et position de l'embâcle. Photo de la zone d'embâcle et mouille en aval.

Les individus 16 (350 mm) et 18 (411 mm), après avoir passé environ 1 mois sous l'embâcle, ont franchi la zone d'embâcle entre le 10 avril et le 24 avril. Durant cette période, le niveau d'eau maximal a été de 18,6 cm (le niveau d'eau médian sur ce cours d'eau et pendant la durée d'étude est de 11,3 cm). L'individu 15 (400 mm) quant à lui, est resté presque 9 mois à l'aval de l'embâcle avant de le franchir entre le 4 et le 11 décembre (niveau d'eau maximal durant cette période : 25,8 cm). On peut penser qu'il s'agit là d'une migration de reproduction pour rejoindre des sites de fraie en amont. Enfin, l'individu 14 (342 mm) a été capturé dans la mouille sous l'embâcle, et est revenu sur ce lieu de capture suite au marquage. Il n'a apparemment pas franchi l'embâcle lors de la durée du suivi, restant sur cette zone qui correspond certainement à son gîte.

Ce graphe illustre la variabilité comportementale individuelle. En effet, pour un même scénario et des mêmes conditions environnementales, les comportements de franchissement d'embâcle sont très différents.

8.2.6. Heures d'activité au boitier fixe des Ponts de Pierre (Mérantaise)

Le boitier fixe des Ponts de Pierre, contrairement aux trois autres, n'a pas été installé à l'aval d'un obstacle jugé infranchissable pour les truites. De plus, la zone d'écoute (20 m à l'aval et 5 m à l'amont du boitier) n'a pas été un lieu de résidence des poissons. Ce boitier a enregistré uniquement des passages rapides de truites et est donc un bon indicateur de leur activité migratrice. Au total, 10 individus ont pu être pris en compte dans cette analyse.

La Figure 70 présente le temps potentiel à chaque heure de la journée en période de reproduction et hors période de reproduction. Le temps potentiel représente la somme des temps d'enregistrement de passage de tous les poissons par le boitier fixe/durée de fonctionnement totale du boitier.

La période de reproduction a été déterminée selon différents critères :

- Date de fraie : le début de la fraie a été estimé aux alentours du 8 novembre 2012 et de nouvelles frayères ont été aperçues jusqu'au 23 janvier 2013.
- Température et niveau d'eau : à partir du 20 septembre, la température de l'eau commence à descendre en dessous de 10°C et une série de "crués" (niveau d'eau supérieur à 40 cm) débute sur la Mérantaise. A l'inverse, le 23 février marque la fin d'un épisode de "crués" importantes (niveau max sur la Mérantaise=104,60cm et niveau max sur l'Aulne=65,10cm) sur les deux cours d'eau.
- Etude des trajectoires : certaines truites au comportement sédentaire hors période de reproduction semblent débiter des déplacements dès fin septembre-début octobre. Il peut s'agir là de recherche de zone de fraie ou bien de confection du nid en vue de la reproduction. Il est donc essentiel que ces déplacements soient compris dans la période de reproduction déterminée.

Afin d'inclure tous les déplacements liés à la reproduction (recherche pré-reproduction de site de fraie, recherche de partenaire, confection du nid, ponte et garde du nid, migration post reproduction...), la période dite de reproduction s'étalera du 20 septembre 2012 au 23 février 2013.

Exemple de lecture du graphique, si l'on se positionne en abscisse à 4 heure du matin :

Hors période de reproduction, le boîtier a fonctionné pendant 308 160 min au total (soit 214 jours). Sur ces 308 160 minutes, 118 comportent des enregistrements de passage de poisson qui ont eu lieu entre 4 et 5h du matin (soit temps potentiel à 4h hors période de reproduction = 0,038%).

En période de reproduction, le boîtier a fonctionné pendant 224 640 min au total (soit 156 jours). Sur ces 224 640 minutes, 353 sont des enregistrements de poisson qui ont eu lieu entre 4 et 5h du matin (soit temps potentiel à 4h en période de reproduction = 0,157%).

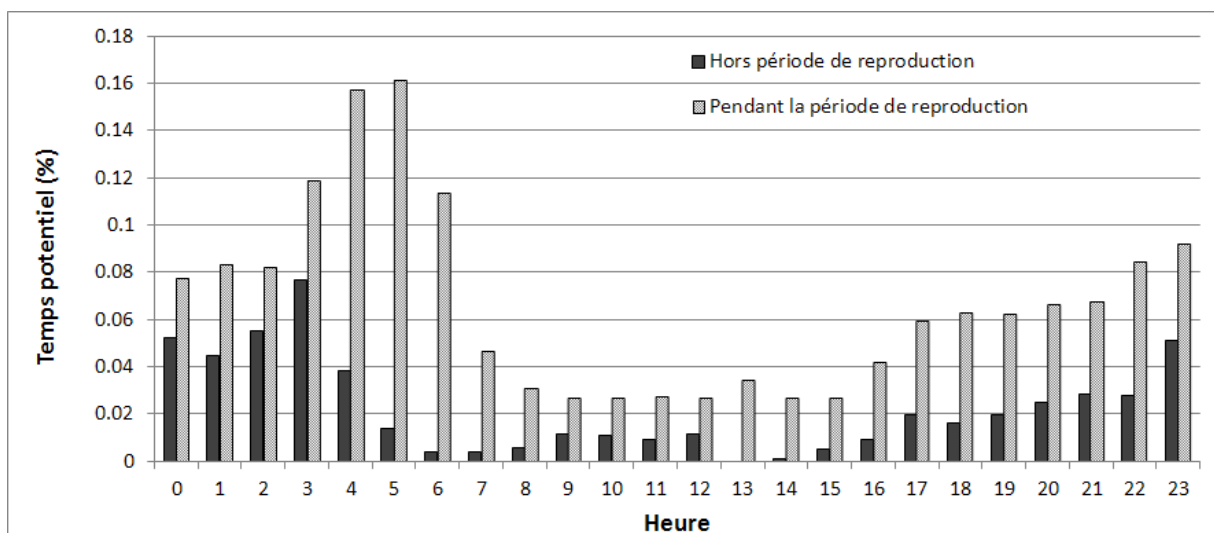


Figure 70 – Temps potentiel d'enregistrement de passage de tous les poissons par le boîtier fixe des Ponts de Pierre en fonction de l'heure et de la période.

De façon générale, on remarque une activité migratrice nettement plus importante pendant la période de reproduction. Entre 16h et 22h, l'activité en période de reproduction est au moins 3 fois supérieure à celle enregistrée hors période de reproduction.

On constate également que l'amplitude horaire d'activité est plus importante en période de reproduction. A cette période, l'activité migratrice est élevée de 17h à 6h du matin alors que hors période de reproduction elle s'opère principalement entre 23h et 3h du matin.

8.2.7. Mouvements effectués lors de la période de reproduction

12 truites ont pu être suivies avant et pendant la période de reproduction. Trois d'entre elles n'ont plus été entendues après la période de reproduction (un émetteur a été retrouvé sur la berge à proximité d'une frayère importante).

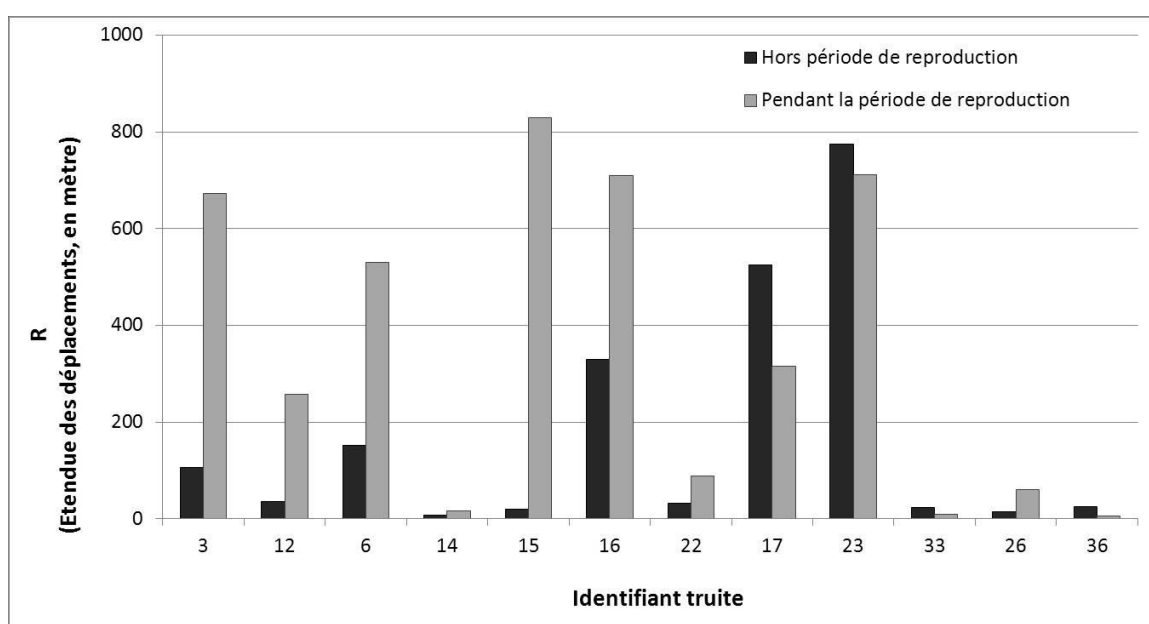


Figure 71 – Etendue des déplacements pendant et hors période de reproduction

Sur les 12 poissons suivis, 8 montrent une étendue de déplacement plus importante en période de reproduction.

8.2.8. Relations entre mouvements et variables environnementales

La Figure 72 permet d'étudier les relations entre les mouvements effectués par chaque poisson en fonction de la température et des niveaux d'eau sur l'Aulne.

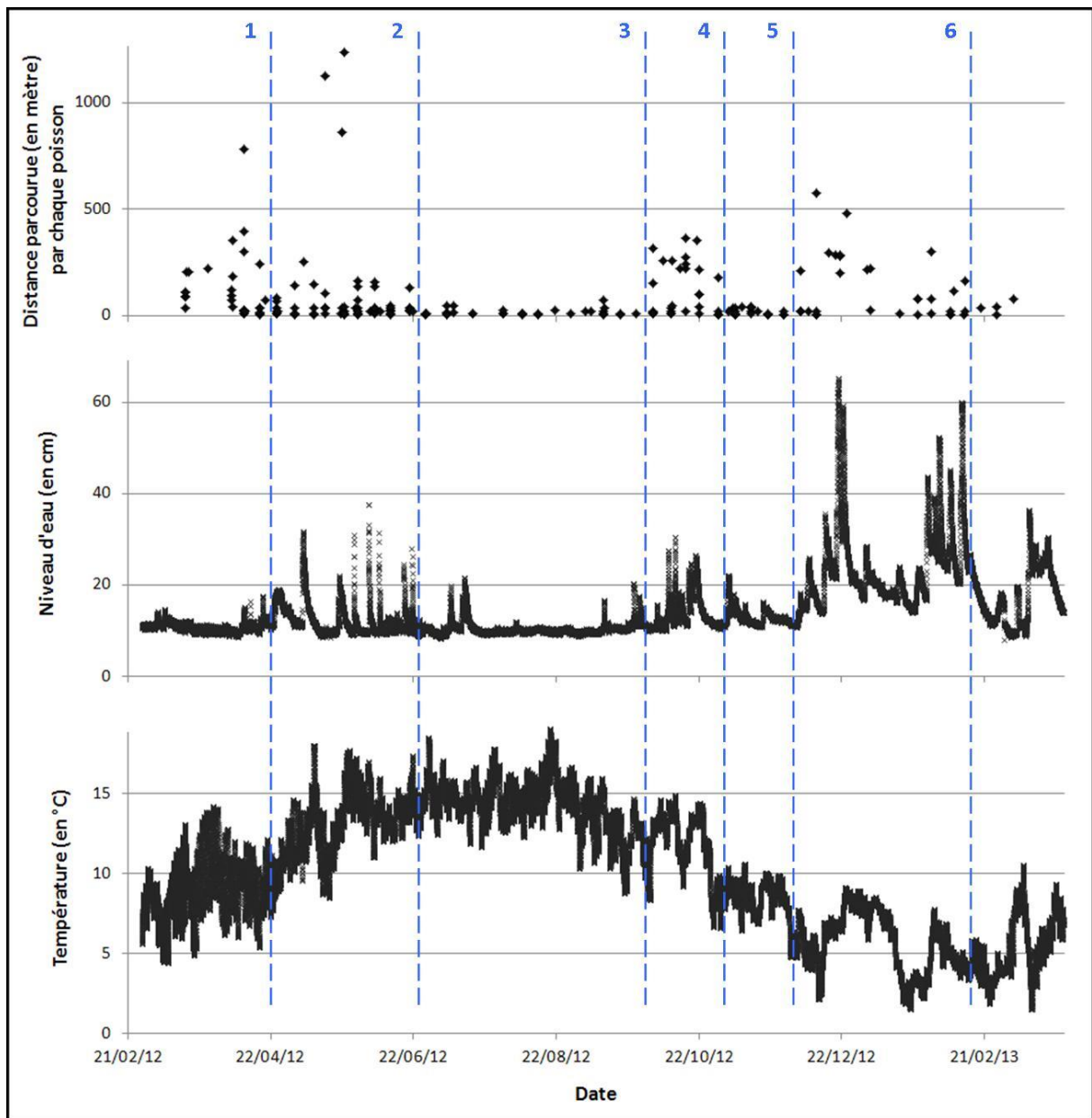


Figure 72 – Distance parcourue par tous les poissons sur l'Aulne en fonction des niveaux d'eau et de la température aux mêmes dates.

Des mouvements de poisson importants sont observés en phase 1, 2, 4 et 6. A l'inverse les distances parcourues par les 12 truites suivies sur l'Aulne sont faibles en phase 3 et 5.

Concernant la phase 1 (et une partie de la phase 2), les mouvements observés sont très probablement liés au marquage (retour vers le lieu de capture, recherche d'un nouveau gîte,...).

Les phases 2 et 4 montrent de nombreux déplacements de poisson et de grandes distances parcourues (>100 m). Ces phases correspondent à des périodes où le niveau d'eau passe plusieurs fois au-delà de 20 cm. Les températures sont ascendantes en phase 2 et descendantes en phase 4. Il est probable que la phase 4 illustre le déclenchement des mouvements de recherche de site de fraie avant la reproduction.

La phase 3 correspond à la période estivale avec de faibles niveaux d'eau et des températures élevées. Les mouvements des poissons sont plus rares et de faibles distances. La phase 5 intervient en pleine période de reproduction, la première frayère ayant été aperçue le 8 novembre 2012 à l'aval de la Galetterie sur l'Aulne. Pourtant peu de grands déplacements sont observés. On remarque qu'à cette période très peu de pics de niveau d'eau ont lieu et que la baisse des températures marque un arrêt entre 7 et 10 °C.

La phase 6 expose de nombreux déplacements de très grande amplitude. Le début de cette phase est marqué par une reprise de la baisse des températures, qui sont alors nettement au-dessous de 10°C et par de nombreux épisodes d'élévation du niveau d'eau. Durant cette phase, le niveau maximal de l'eau sur ce cours d'eau atteint 65,1 cm. La phase 6 correspond certainement aux déplacements effectués pendant et après la reproduction.

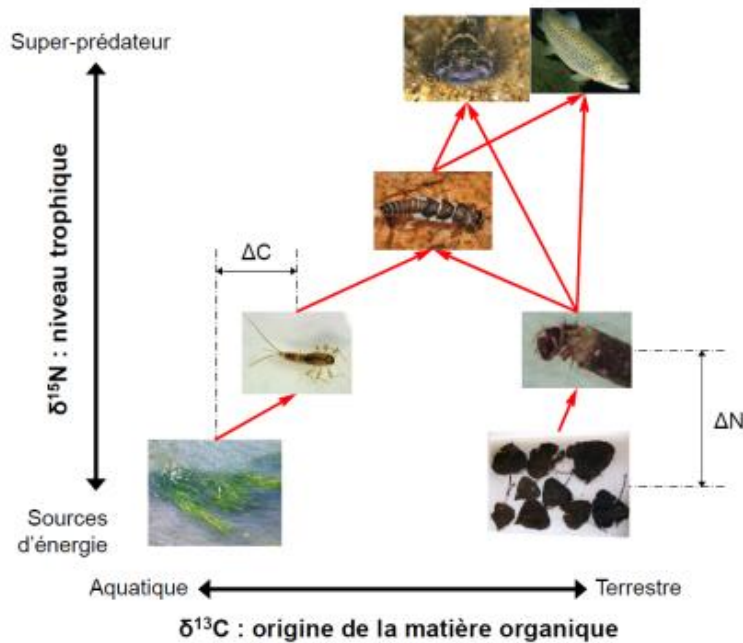
9. Evaluation de la diversité trophique sur l'Aulne à Béchereau

La diversité trophique d'un écosystème est définie comme la diversité des interactions d'ordre alimentaire qui s'y déroulent. Ces interactions sont fondamentales pour l'écosystème. En effet les interactions alimentaires représentent une grande partie des interactions entre êtres vivants et constituent une part importante du fonctionnement biologique d'un écosystème. Par exemple, les interactions alimentaires constituent les voies selon lesquelles la matière et l'énergie se transfèrent au sein d'un écosystème. Pour cette raison, elles permettent d'expliquer la propagation des perturbations au sein des écosystèmes. Par ailleurs, ces interactions sous-tendent les dynamiques de population par l'intermédiaire des relations proies-prédateurs. Enfin, la réalisation d'une interaction alimentaire dépend aussi des êtres vivants présents au sein de l'écosystème. La diversité trophique intègre donc également des aspects structurels de l'écosystème, comme la structure de son peuplement. Ces caractéristiques font de la diversité trophique un outil potentiellement pertinent pour suivre l'évolution des écosystèmes dans le cadre d'actions de restauration.

Au sein de l'équipe HEF, la caractérisation de la diversité trophique en cours d'eau a été développée depuis 2007 et a notamment donné lieu à deux actions de recherche financées par l'AFB (action 33 de la convention 2013-2015 et action 20 de la convention 2016-2018). L'approche adoptée est une approche empirique d'observations in situ de la diversité trophique par le biais de l'analyse des isotopes stables. Les détails méthodologiques de cette approche ont été décrits dans les rapports des actions précédemment citées.

Le choix d'utiliser l'outil isotopique a été motivé par la possibilité de quantifier la diversité trophique grâce à cet outil sans avoir à déterminer l'ensemble des interactions alimentaires. Le principe de cet outil est comparable à celui de la bioaccumulation. Il repose généralement sur la détermination des isotopes stables des éléments carbone et azote. À la base des chaînes alimentaires, il y a une quantité déterminée des isotopes légers et lourds du carbone, respectivement de l'azote. Le ratio isotope lourd sur léger constitue le signal isotopique de base. Ce signal se modifie ensuite à chaque interaction d'ordre alimentaire, l'isotope lourd ayant tendance à s'enrichir. Pour le carbone, cet enrichissement est faible, ce qui fait que le signal isotopique d'un être vivant est voisin du signal isotopique de son régime alimentaire. Pour l'azote, l'enrichissement est important, ce qui permet de distinguer un prédateur de sa proie. En mesurant les signaux isotopiques des différents êtres vivants d'un écosystème on

obtient donc une image isotopique de la diversité trophique (Figure 73). La variabilité des signaux isotopiques du carbone renseigne sur la diversité des sources de matières organiques exploitées par l'écosystème, et la variabilité des signaux isotopiques de l'azote renseigne sur la diversité des niveaux trophiques présents dans l'écosystème (des producteurs primaires au super-prédateur).



© Nicolas Hette-Tronquart

Figure 73 – Principe de l'utilisation des isotopes stables pour les études de diversité trophique. Les principaux transferts d'énergie s'effectuent suivant le sens des flèches. ΔC et ΔN représentent le fractionnement isotopique existant entre un consommateur et sa nourriture.

Dans le cas de l'Aulne, nous avons utilisé l'approche développée dans le cadre des actions 33 (Hette-Tronquart et Belliard, 2016) et 20 (Hette-Tronquart et Belliard, 2018) pour estimer la diversité trophique aux deux stations suivies par le projet (une station en aval et une station en amont du seuil). La même stratégie d'échantillonnage des communautés a été utilisée. Les prélèvements ont été effectués début juillet 2016 pour les taxons cibles de macroinvertébrés (éphémères, gastéropodes, bivalves, trichoptères, gammarès, zygoptères, chironomes, oligochètes) et pour les sources de matières organiques (biofilm, matière en suspension et litière). Quelques taxons dominants à l'échelle de la station ont également été échantillonnés (écrevisses, mégaloptères, ...). Le compartiment piscicole a été échantillonné en octobre 2016 à l'occasion de pêches électriques complètes. Des prélèvements de morceaux de nageoires ont été réalisés pour chaque espèce capturée par pêche électrique. Ce type de tissu a été préféré au prélèvement classique du muscle dorsal blanc, développé à l'origine pour les milieux marins. Il permet d'éviter le sacrifice de l'individu, la majorité des poissons survivant à ces ablations partielles de nageoires, ce qui s'avère important dans les milieux aquatiques d'eau douce protégés. Ce tissu est intégrateur du régime alimentaire des individus sur quelques semaines à quelques mois précédant le prélèvement. L'utilisation de ce tissu pour étudier la diversité trophique a été validée par l'existence de relations linéaires entre les

signaux isotopiques des muscles et des nageoires (Hette-Tronquart et al., 2013). Lorsque c'était possible, l'échantillonnage de 5 individus était réalisé afin d'évaluer la variabilité individuelle des signaux isotopiques. Une fois que les analyses isotopiques des différents membres de l'écosystème ont été réalisées, les signaux isotopiques en carbone et azote permettent de les placer dans le plan isotopique. Les résultats des signaux isotopiques obtenus pour chaque compartiment sont présentés dans la Figure 74.

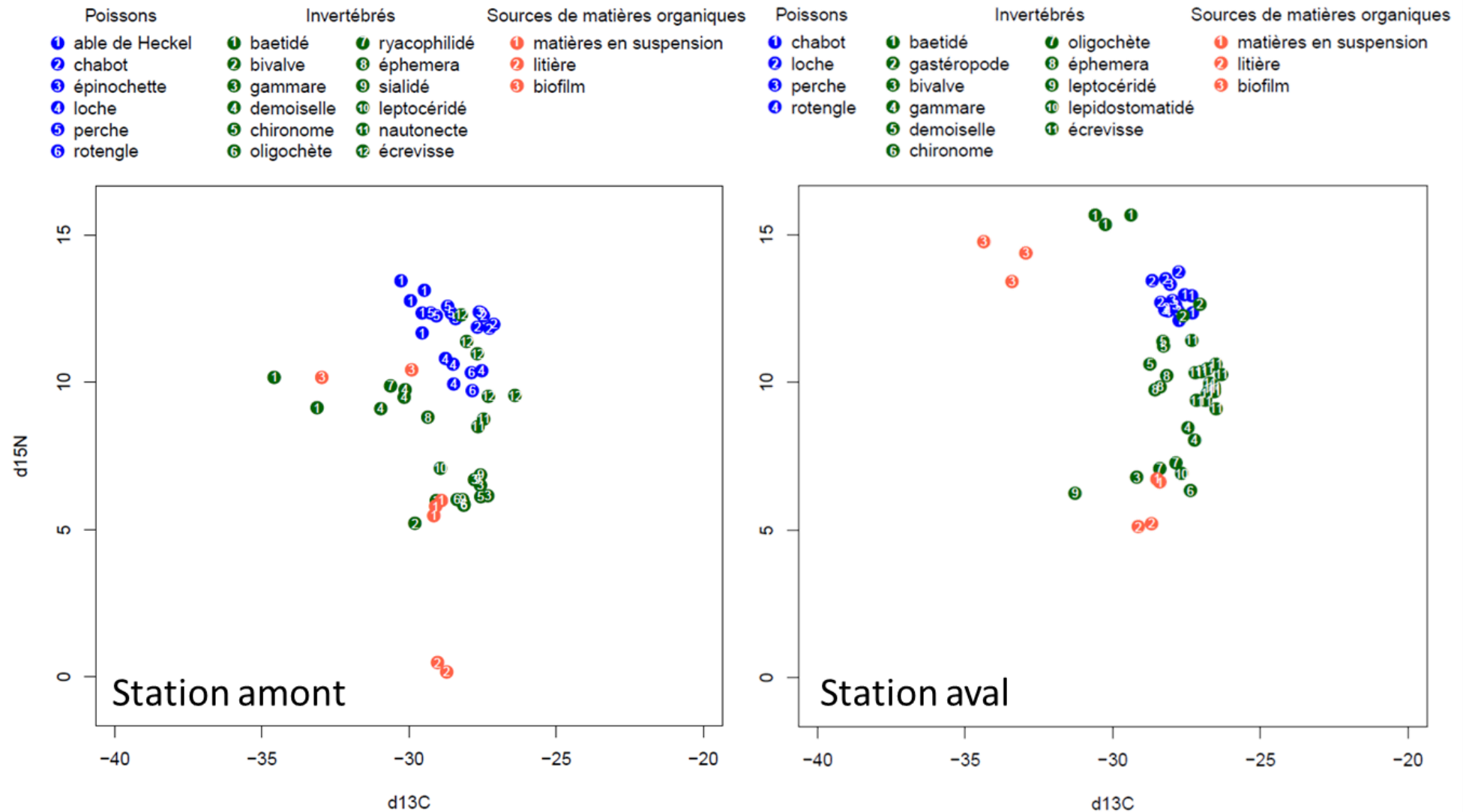


Figure 74 – Résultats de la diversité isotopiques des divers compartiments échantillonnés aux deux stations amont et aval du seuil de Béchereau.

Chaque point représente un individu échantillonné pour chaque taxon (de 1 à 5 individus). Concernant les sources de matière organiques, on remarque une grande diversité de leur position trophique. Si les matières en suspension ont la même position entre la station amont et aval, la litière possède une position basse sur le plan N pour la station amont et c'est le biofilm qui a une position haute pour la station aval. Le biofilm, dont le développement est rapide, semble ne pas utiliser les mêmes sources d'azote entre les deux stations, notamment elles peuvent refléter des sources d'origine anthropique comme les apports agricoles. La date du prélèvement, effectuée quelques semaines après la crue de juin 2016, pourrait expliquer des apports de matières organiques contrastées. Les positions des macroinvertébrés sur l'axe azote suivent globalement la hiérarchie des consommateurs primaires (oligochetes, chironomes) jusqu'au macroinvertébrés prédateurs (demoiselle, ephemera), excepté les baetidés qui ont une position très haute (au-dessus des poissons) à la station aval, sans doute en lien avec la consommation de biofilm. Le groupe indicateur choisi comme indiquant le niveau de base du réseau trophique : les bivalves (durée de vie longue et régime alimentaire peu sélectif) a une position légèrement plus haute sur l'axe N à la station aval. Concernant les poissons, l'able de Heckel et la perche présents à l'amont ont une position haute sur l'axe de l'azote et décalée par rapport aux autres espèces. Il est probable que cette position soit liée aux ressources trophiques présentes dans les étangs plutôt qu'à celles du cours d'eau. Alors que les chabots ont à peu près la même position dans le plan C/N pour les deux stations, les loches ont une position sur l'axe N qui est plus basse pour la station amont.

La position des signaux isotopiques de chaque taxon dans le plan isotopique est utilisée pour calculer les métriques isotopiques les métriques isotopiques qui permettent de quantifier différents aspects de la diversité trophique, notamment la diversité des positions trophiques et celle des ressources exploitées.

À partir des données isotopiques obtenues sur l'Aulne, nous avons calculé trois métriques de diversité trophique suivant la méthode décrite dans l'article Hette-Tronquart et al. 2017 et son matériel supplémentaire ESM 2. Cette méthode permet d'obtenir une estimation bayésienne de la variabilité de chaque métrique associée à sa valeur. Les trois métriques retenues sont : **ISA** ou l'aire de l'espace isotopique occupé par l'écosystème correspondant à la diversité trophique totale, **CR** ou l'intervalle des signaux isotopiques du carbone, correspondant à la diversité des sources de matières organiques, et **NR** ou l'intervalle des signaux isotopiques de l'azote, correspondant à la diversité des niveaux trophiques.

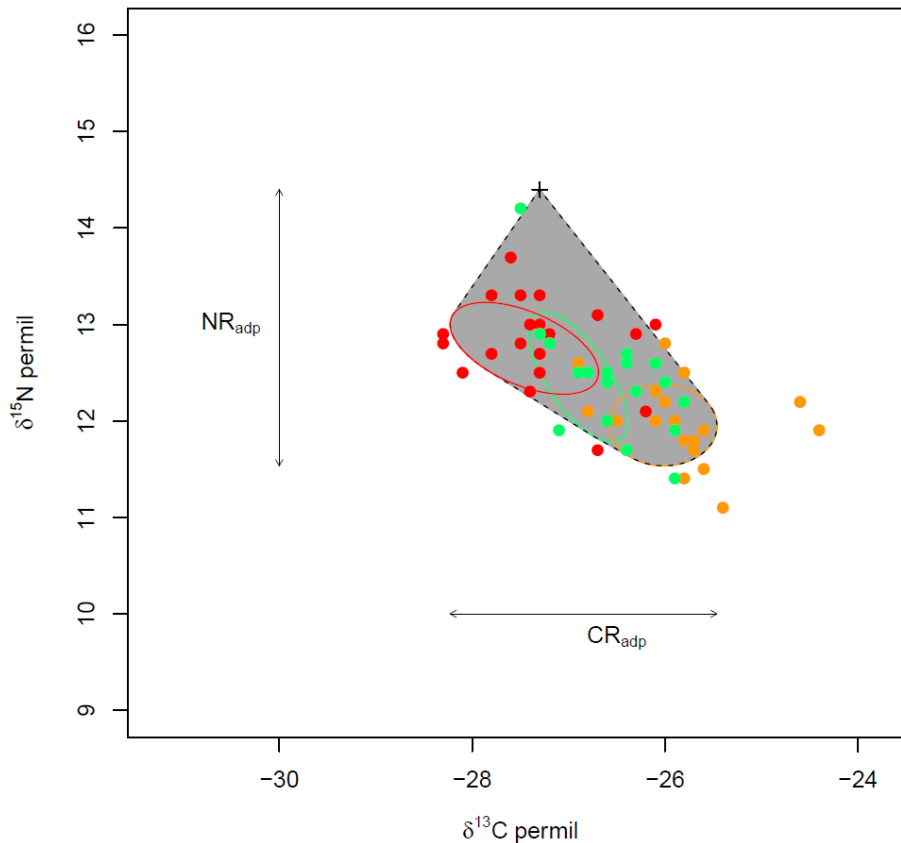


Figure 75 – Exemple théorique illustrant le calcul des métriques isotopiques. Les points représentent des individus de trois espèces (en couleur) pour lesquelles des ellipses standards ont été calculées et un individu d'une espèce (croix). L'aire de l'espace isotopique (ISA) correspond à l'aire du polygone convexe qui contient les ellipses standards et les individus extrêmes (aire en gris). L'ellipse standard est une ellipse qui contient environ 40 % des signaux du jeu de données initial. CR et NR correspondent à la longueur des flèches sur chaque axe (d'après Hette-Tronquart et al. 2017).

Nous avons calculé ces métriques pour l'ensemble des taxons échantillonnés, ce qui correspond à la majeure partie du réseau trophique. À titre de comparaison, nous avons aussi calculé ces métriques à l'échelle restreinte du compartiment piscicole afin de les replacer dans le contexte plus générale du bassin versant de l'Orge, pour lequel nous disposons de mesures de la diversité trophique piscicole (17 sites, cf. Hette-Tronquart et al. 2017). Les résultats obtenus sont synthétisés dans le D'une manière générale, on observe une plus grande diversité trophique sur la station située en amont du seuil. Ces métriques sont sensibles au nombre d'espèces et la métrique ISA augmente généralement avec le gradient amont-aval (résultats sur l'Orge, rapport action 33, 2016). Dans notre cas, la valeur de l'aire de l'espace isotopique (métrique ISA) est plus élevée en amont du seuil que ce soit pour l'ensemble du réseau trophique ou pour les poissons dans le cas où tous les taxons sont pris en compte.

Tableau 15. Le calcul est présenté en tenant compte de tous les taxons présents dans chaque station puis uniquement pour les taxons communs aux deux stations.

D'une manière générale, on observe une plus grande diversité trophique sur la station située en amont du seuil. Ces métriques sont sensibles au nombre d'espèces et la métrique ISA augmente généralement avec le gradient amont-aval (résultats sur l'Orge, rapport action 33, 2016). Dans notre cas, la valeur de l'aire de l'espace isotopique (métrique ISA) est plus élevée en amont du seuil que ce soit pour l'ensemble du réseau trophique ou pour les poissons dans le cas où tous les taxons sont pris en compte.

Tableau 15 – Synthèse des mesures de la diversité trophique. Valeur moyenne de la métrique en gras, écart-type associé entre parenthèses.

Tous taxons	station aval	station amont	BV Orge : min-moy-max
réseau trophique			
ISA	60,98 (10,25)	62,58 (8,41)	
CR	9,06 (1,58)	8,46 (0,96)	
NR	10,71 (1,45)	13,51 (1,00)	
poissons			
ISA	2,50 (1,34)	7,69 (2,42)	0,36 – 5,10 – 12,02
CR	1,82 (0,77)	3,37 (0,91)	0,6 – 2,74 – 4,37
NR	2,32 (0,89)	4,02 (0,81)	0,73 – 2,96 – 5,23
Taxons commun			
	station aval	station amont	
réseau trophique			
ISA	60,32 (8,61)	59,22 (8,44)	
CR	9,00 (1,47)	8,59 (1,05)	
NR	10,62 (0,90)	12,72 (0,80)	
poissons			
ISA	2,51 (1,35)	4,87 (1,88)	
CR	1,84 (0,81)	2,55 (0,91)	
NR	2,31 (0,86)	3,22 (0,69)	

Pour les poissons, c'est la présence de nouvelles espèces provenant des étangs (mise en connexion des étangs et du cours d'eau lors de la crue de juin 2016) qui élargit l'espace isotopique occupé par la communauté piscicole mais aussi des espèces, comme la loche franche et le rotengle qui ont des positions isotopiques plus basses sur l'axe azote à la station amont du seuil par rapport à l'aval. A l'aval, le nombre d'espèce est plus faible que ce qui a été observé les années précédentes (Tableau 9), avec notamment l'absence de truite et de gardon, ce qui pourrait expliquer les faibles valeurs des métriques sur cette station. Cependant, les valeurs sur l'Aulne restent dans la gamme observée dans l'étude sur le bassin versant de l'Orge. Une valeur faible de la métrique ISA indiquant souvent un peuplement monospécifique. D'une manière générale, on observe une plus grande diversité trophique sur la station située en amont du seuil. Ces métriques sont sensibles au nombre d'espèces et la métrique ISA augmente généralement avec le gradient amont-aval (résultats sur l'Orge, rapport action 33, 2016). Dans notre cas, la valeur de l'aire de l'espace isotopique (métrique ISA) est plus élevée en amont du seuil que ce soit pour l'ensemble du réseau trophique ou pour les poissons dans le cas où tous les taxons sont pris en compte.

Tableau 15).

De plus, cette diversité trophique s'explique aussi par une plus grande diversité des niveaux trophiques occupés (métrique NR), notamment avec une position de la litière très basse. Cependant, la diversité des ressources de matières organiques exploitées par l'écosystème semble être légèrement plus grande à l'aval du seuil (métrique CR). Ces différences sont statistiquement très significatives (p -value <0.001 , t-test de Student) et ne peuvent pas être attribuées à des incertitudes liées à l'échantillonnage ou aux analyses isotopiques.

Ces tendances se retrouvent également au niveau du compartiment piscicole dans le cas où l'on ne considère que les taxons communs. Dans ce cas, les trois métriques ISA, CR et NR sont plus élevées en amont du seuil qu'en aval. Ces valeurs sont cohérentes avec celles observées sur le bassin-versant de l'Orge (intervalle de ISA : 0.36-12.02, de CR : 0.6-4.37, de NR : 0.73-5.23). Les valeurs observées de diversité trophique piscicole en amont du seuil sont plus fortes que celles que nous avons observées en moyenne sur le bassin versant de l'Orge, tandis qu'elles sont plus faibles en aval.

Les différences de diversité trophique sont notables mais semblent témoigner d'une situation particulière, liée à la crue de 2016, qui a permis un apport d'espèces venant des étangs pour la station amont et une perte d'espèces pour la station aval. Ainsi, il semble que cette situation accroît les niveaux trophiques occupés en amont alors que la station aval conserve une diversité des sources de matière organique exploitée.

Cet état avant travaux de restauration serait à compléter pour évaluer la diversité trophique en période hors effet crue.

10. Modélisation des probabilités de recolonisation des frayères à truite potentielles suite à la restauration de la continuité écologique de la Mérantaise

10.1. Principe de modélisation à l'aide du logiciel Anaqualand 2.0

A l'échelle des axes entiers de cours d'eau, souvent fragmentés par de nombreux ouvrages, la sélection des ouvrages prioritaires à l'aménagement pour rétablir la continuité doit donc se baser à la fois sur leur franchissabilité mais aussi sur leur effet cumulatif. Or, peu de méthodes opérationnelles de quantification de l'accessibilité des habitats nécessaires au cycle de vie des poissons sont disponibles pour établir un diagnostic fonctionnel préalable aux actions de restauration. Tenir compte des effets cumulatifs des ouvrages interconnectés est jugé essentiel pour hiérarchiser les contraintes environnementales et socio-économiques lors des décisions de restauration (Kemp and O'Hanley 2010).

Le logiciel Anaqualand 2.0, développé depuis 2002 à Irstea, permet d'évaluer la connectivité dans les cours d'eau par le calcul de distances orientées (Le Pichon et al. 2006). Le logiciel fonctionne en 2D avec des cartes raster (grilles de format « ascii »), évaluant ainsi la connectivité longitudinale et latérale. Implémenté avec une interface utilisateur, le logiciel permet d'évaluer la connectivité structurelle par le calcul d'une distance hydrographique qui correspond au déplacement d'un poisson dans le cours d'eau, la distance euclidienne n'étant pas pertinente dans ce cas. La distance hydrographique représente la longueur de l'arc le plus court partant d'un point source vers un point cible et passant par le cours d'eau. Le calcul se fait par diffusion de proche en proche selon un algorithme simulant la propagation d'un signal. De plus, cette distance est plus ou moins difficile à parcourir par un poisson selon les conditions du milieu à traverser : la connectivité fonctionnelle est évaluée en utilisant la notion de « résistance » du milieu au déplacement des poissons. La valeur des résistances a été établie sur la base des capacités de nage des poissons et sur l'évitement comportemental lié à la prédation. La résistance cumulée minimale, RCM (Knaapen et al. 1992) intègre à la fois la distance et la résistance au déplacement d'une espèce. Le logiciel permet ensuite de convertir la RCM en probabilité qu'un poisson d'une taille donnée atteigne un habitat cible ou l'habitat le plus proche, tenant compte de la difficulté du parcours (Le Pichon et al. 2007). L'ensemble des cartes « RCM » et « probabilités » obtenues est exportable en raster ascii pour être ensuite réimportées dans un Système d'Information Géographique.

10.2. Données cartographiques utilisées

Toutes les modélisations et analyses présentées ont été effectuées à partir du tracé géo-référencé de la Mérantaise qui a été converti en 2D en considérant une largeur de 5 m, ce qui correspond à la largeur moyenne du cours d'eau. Les cartes utilisées ont été converties en raster de 0.5 m de résolution... Les opérations géomatiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SIG ArcGis®.

10.2.1. Carte des frayères et des habitats journaliers potentiels

Les frayères potentielles ont été identifiées par une prospection continue du linéaire de la Mérantaise, sur la base d'une combinaison de taille du substrat, de profondeur et de vitesse

et de position par rapport au faciès radier, grâce à l'expertise du technicien rivière du PNR HVC qui réalise depuis 2008 des relevés à chaque période de reproduction (Figure 76).

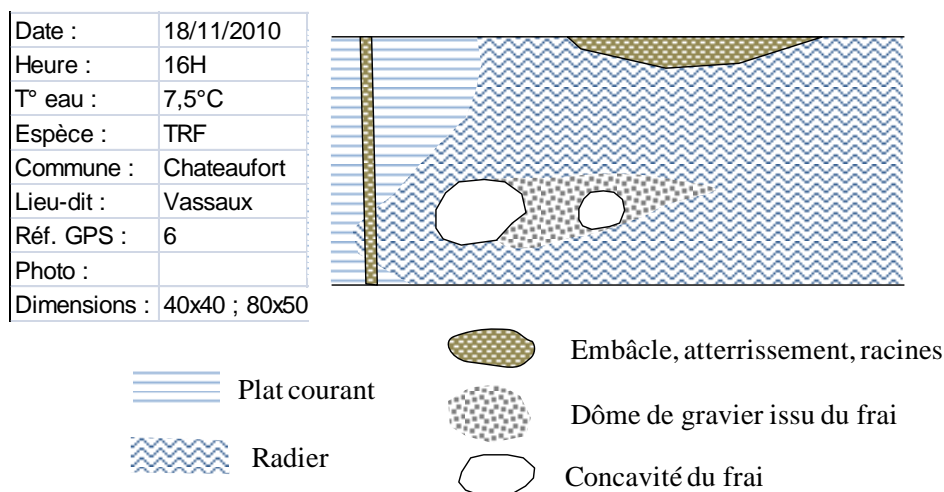


Figure 76 – Exemple de relevé de frayère, réalisé par le PNR HVC en 2010 sur la Mérantaise

La localisation et la taille des frayères potentielles ont été cartographiées dans le SIG et une carte binaire des taches de frayère a été réalisée. La distribution longitudinale de ces frayères est présentée dans la Figure 77. On observe que les frayères sont groupées dans certains secteurs qui correspondent aux secteurs où sont présents les radiers.

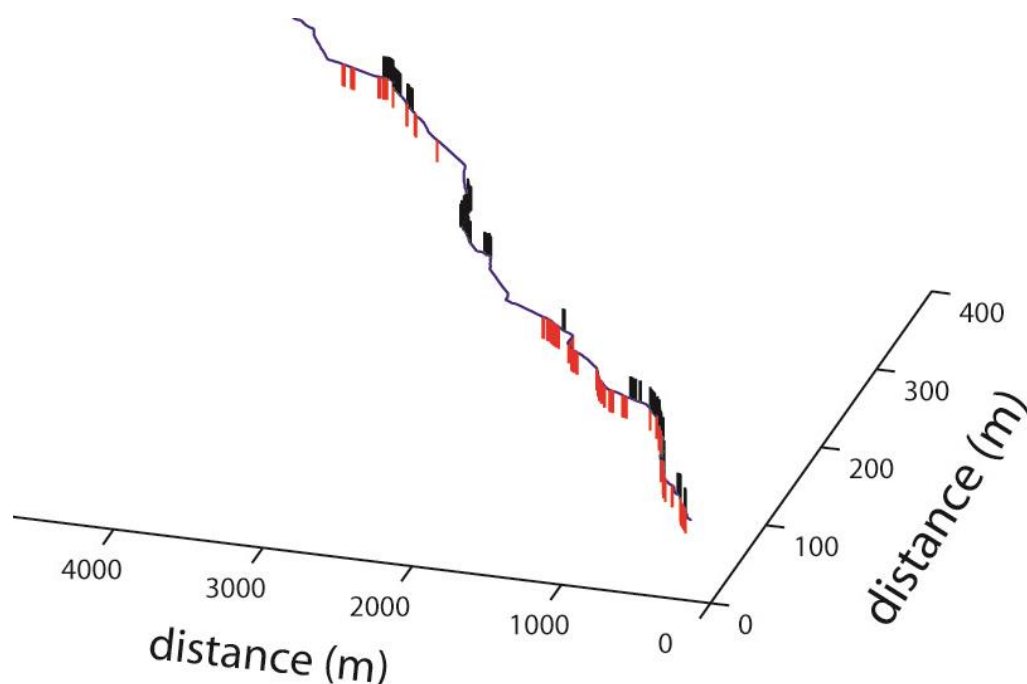


Figure 77 – Distribution longitudinale des frayères potentielles (noir) et des habitats journaliers (rouge) le long de la Mérantaise.

Les habitats journaliers ont été définis comme les habitats favorables à la truite en dehors de la période de reproduction. Pour identifier les habitats journaliers, nous avons modélisé la probabilité de présence des truites en croisant les données de localisation des truites par radio-téléométrie obtenues en dehors de la période de reproduction et des variables décrivant la

proximité à des habitats clés : la distance à la mouille la plus proche (dM), au radier le plus proche et à l'abris le plus proche (dA).

Ces variables ont été utilisées car elles se sont relevées être de bon descripteurs de la présence des truites dans une précédente étude réalisée dans des cours d'eau de tête de bassin en Île-de-France (Le Pichon et al. 2013). La probabilité de présence des truites plus élevée dans les mouilles situées à proximité des radiers (de l'ordre d'une dizaine de mètres) s'explique par l'avantage de ces habitats de combiner les avantages de la fonction de refuge et d'abri des mouilles et de la fonction d'alimentation des seuils (Ovidio 1999; Ovidio et al. 2002).

Dans un premier temps, le logiciel Anaqualand 2.0 a été utilisé pour générer les trois cartes de distance. Chaque carte est un fichier raster avec une valeur de distance en mètres pour chaque cellule (pixel) ; cette valeur étant nulle lorsque la cellule se situe dans une mouille/radier/abri respectivement.

Ensuite, ces valeurs de distance aux habitats ont été échantillonnées pour chaque localisation de truites ainsi que pour un échantillon de pseudo-absences généré aléatoirement dans l'espace à l'aide d'ArcGIS. Un modèle linéaire généralisé (GLM) a été construit, pour lequel les trois variables se sont révélées pertinentes pour expliquer la probabilité de présence des truites. Le modèle, défini par $P = -0,116 - (0,099 * dA) - (0,445 * dM) + (0,0248 * dR)$ ($p = 0,891 ; 0,023 ; 0,003 ; 0,069$ respectivement) indique que la probabilité de présence des truites est associée positivement de manière significative ($p < 0,05$) à la proximité à un abri et une mouille.

La carte de la probabilité de présence des truites a été obtenue en appliquant le modèle GLM à l'étendue totale du tronçon (Figure 78). La carte des valeurs continues a ensuite été reclassée sous forme binaire représentant les taches d'habitats journaliers, où les habitats sont considérés favorables à partir d'un seuil de probabilité de 0,4 (Figure 78). La distribution longitudinale des habitats journaliers est présentée dans la Figure 77.

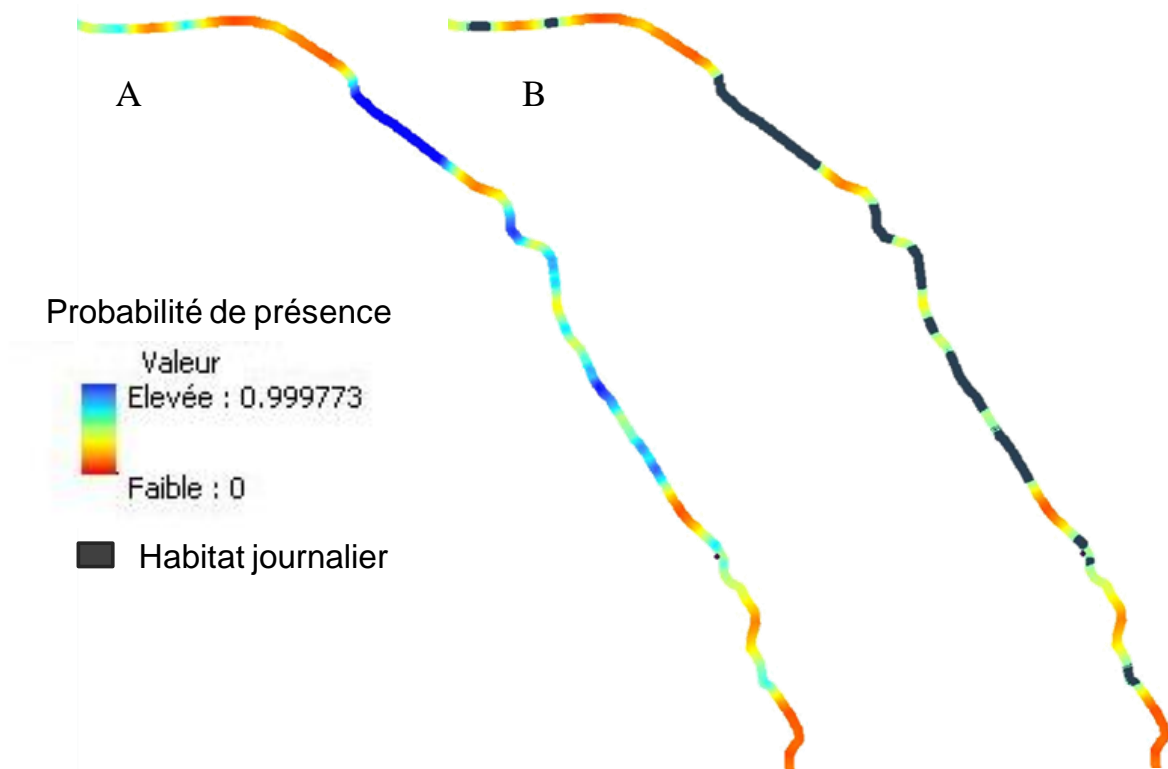


Figure 78 – Probabilité de présence des truites dans leurs habitats journaliers (A) issue du modèle GLM. Taches d'habitats journaliers définies par les probabilités supérieures à 0,4 (B).

10.2.2. Carte de résistance au déplacement vers l'amont

Les cartes de résistance ont été construites en tenant compte des faciès hydromorphologiques (5 types), des obstacles (12) et des abris (présence/absence). Ces variables ont été considérées comme pertinentes car elles peuvent jouer un rôle pour faciliter ou restreindre la mobilité des truites et rendre compte des coûts énergétiques de nage et du risque de prédation.

Les douze obstacles considérés avec leur emprise spatiale ont été ajoutés à la carte des faciès. Les localisations d'abris ont été transformées en zone d'abris en créant une zone tampon de 5 m autour des données ponctuelles, restreinte aux limites latérales du cours d'eau. La carte des abris a été croisée à celle des faciès et des obstacles générant la carte support des catégories de résistance : les faciès et obstacles avec et sans abris. Treize cartes de catégories de résistance ont été générées pour représenter les scénarios d'effacement successifs des 12 obstacles (effacement de l'obstacle 1, puis des obstacles 1 et 2, puis des obstacles 1 à 3, etc.) et le scénario sans effacement.

10.3. Paramètres de modélisation

10.3.1. Valeurs de résistance au déplacement selon la taille

Les valeurs de résistance ont été définies en lien avec le risque de prédation et les coûts énergétiques associés aux mouvements vers l'amont pour traverser chaque faciès et chaque obstacle. Des valeurs attribuées sur une échelle de 0 à 1 ont été données sur la base d'opinion d'experts à chaque variable définissant le coût énergétique et le risque de prédation.

Distance (m)	Grands	Petits	Grands
Moyenne	170	143	351
P85	398	338	710
Maximale	774	366	830

10.4. Modélisation de la connectivité

La carte de résistance et d'habitats fonctionnels : les frayères et les habitats journaliers ont été importées dans le logiciel Anaqualand 2.0 afin de créer des cartes de résistance cumulée minimale, représentant pour chaque pixel de la carte le coût cumulé pour atteindre 1) une frayère à partir du pixel le plus aval, 2) un habitat journalier à partir du pixel le plus aval et 3) une frayère à partir d'un habitat journalier plus aval (exemple Figure 79).

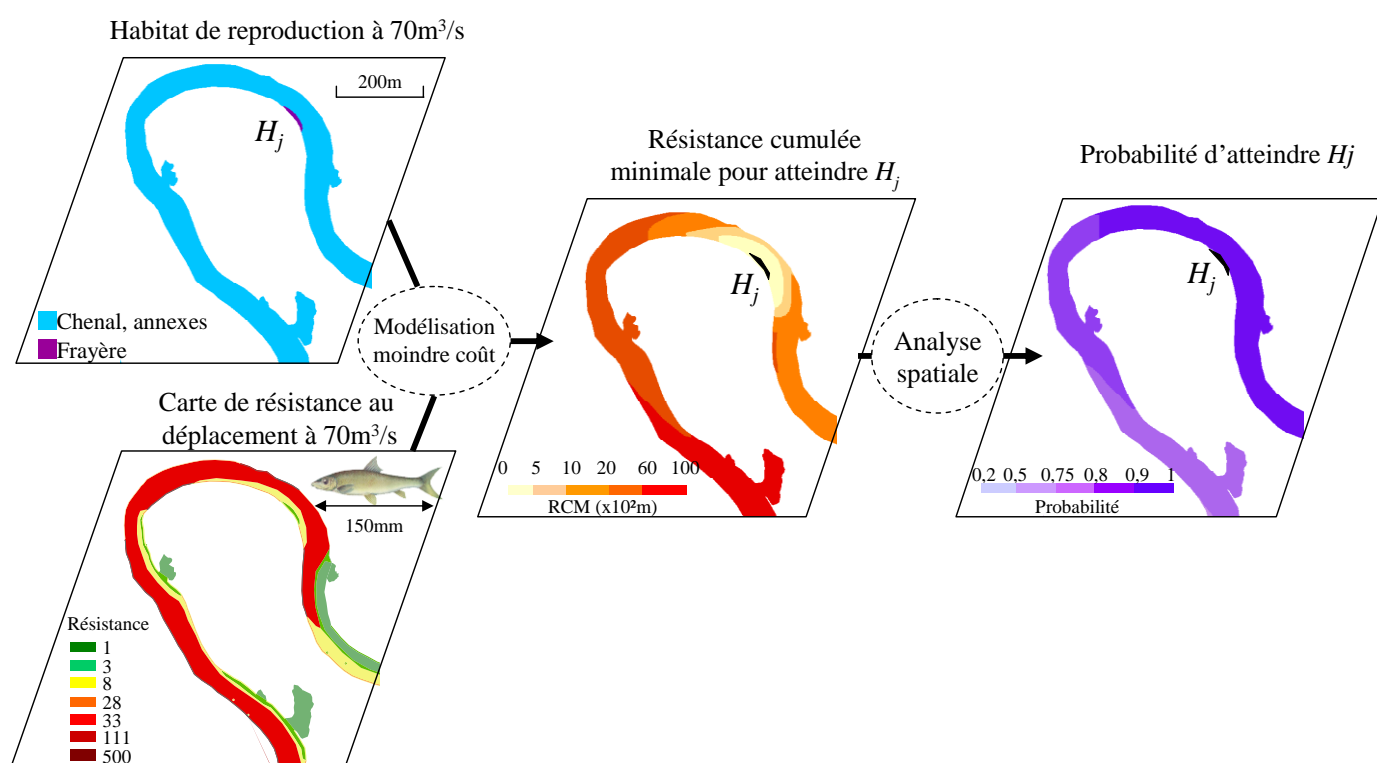


Figure 79 – Schématisation du calcul de résistance cumulée minimale et de probabilité d'atteindre la tache d'habitat H_j , exemple pour un barbeau de 15 cm.

Vingt-six cartes de RCM ont été générées à partir des deux cartes de résistance variant selon la classe de taille des poissons et des 13 scénarios d'effacement de seuils pour chaque type d'analyse, soit l'accessibilité des frayères depuis l'aval ; des habitats journaliers depuis l'aval ; des frayères depuis un habitat journalier en aval. Ces cartes ont ensuite été transformées en probabilité d'atteindre les habitats selon trois classes de mobilité (Tableau 17) et selon deux types de courbes de transformation (exponentielle ou gaussienne).

10.5. Résultats et discussion

Afin de comparer les divers scénarios, un indicateur de connectivité a été calculé, représentant la somme des surfaces de chaque pixel (0,25 m²) de frayères/habitat journalier pondéré par

sa probabilité d'accès. Dans un premier temps, l'évolution cumulée de l'aval vers l'amont de cet indicateur dans la situation actuelle et après effacement de tous les obstacles a été estimé pour les deux tailles de poisson (Figure 80).

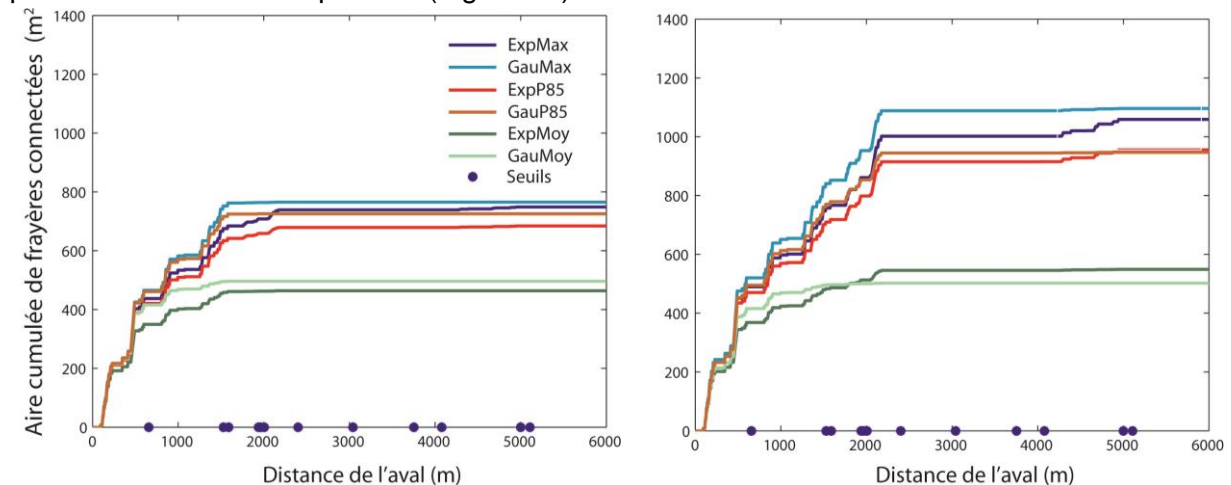


Figure 80 – Evolution cumulée de l'indicateur de connectivité aux frayères avant et après restauration pour les poissons de la classe de taille >23cm.

La figure présente l'évolution longitudinale de l'indicateur de connectivité, qui est lié à la position des obstacles et à celle des habitats. Dans la situation actuelle, la connectivité la plus élevée est observée pour le scénario où la mobilité des poissons est la plus élevée (mobilité maximale) et pour la forme de courbe gaussienne. Après effacement de tous les obstacles, on remarque qu'il n'y a pas de gain de connectivité dans un scénario où les poissons ont une mobilité moyenne. Par contre, dans un scénario de mobilité maximale, on constate une augmentation importante de la connectivité lorsque l'obstacle 3 (seuil d'Ors) est effacé, puis lorsque les effacements permettent d'atteindre une série de frayères situées au-delà de 4 km à partir du point le plus aval.

Une transformation gaussienne des probabilités d'accès exprime un comportement où beaucoup de poissons atteignent des distances modérées, mais ce nombre diminue drastiquement à la rencontre d'obstacles. À l'inverse, une transformation exponentielle négative illustre un comportement où peu de poissons sont mobiles, mais ceux qui le sont peuvent parcourir de grandes distances et sont relativement moins affectés par les obstacles. Ainsi, on observe une augmentation de la connectivité plus rapide au départ de la courbe gaussienne puis celle-ci est dépassée par la courbe exponentielle négative où les probabilités d'atteindre des habitats en amont est plus élevée (Figure 80). Ainsi, l'étude de sensibilité sur la forme de la courbe de probabilité montre que la connectivité peut varier dans la gamme comprise entre ces deux courbes, et que dans tous les cas, on observe une amélioration notable avec l'effacement du seuil d'Ors.

Ensuite, pour évaluer le gain d'effacement de chaque obstacle successivement, on représente l'indice global de connectivité pour chaque scénario. On obtient ainsi le total des frayères ou habitats journaliers connectés depuis l'aval et des frayères connectées aux habitats journaliers (en équivalent m²) (Figure 81). On observe un gain net de connectivité aux frayères lorsque le seuil d'Ors est effacé puis à nouveau lorsque l'on efface les obstacles 5 à 8. Le gain est quasiment nul à poursuivre l'effacement des obstacles 9 à 12.

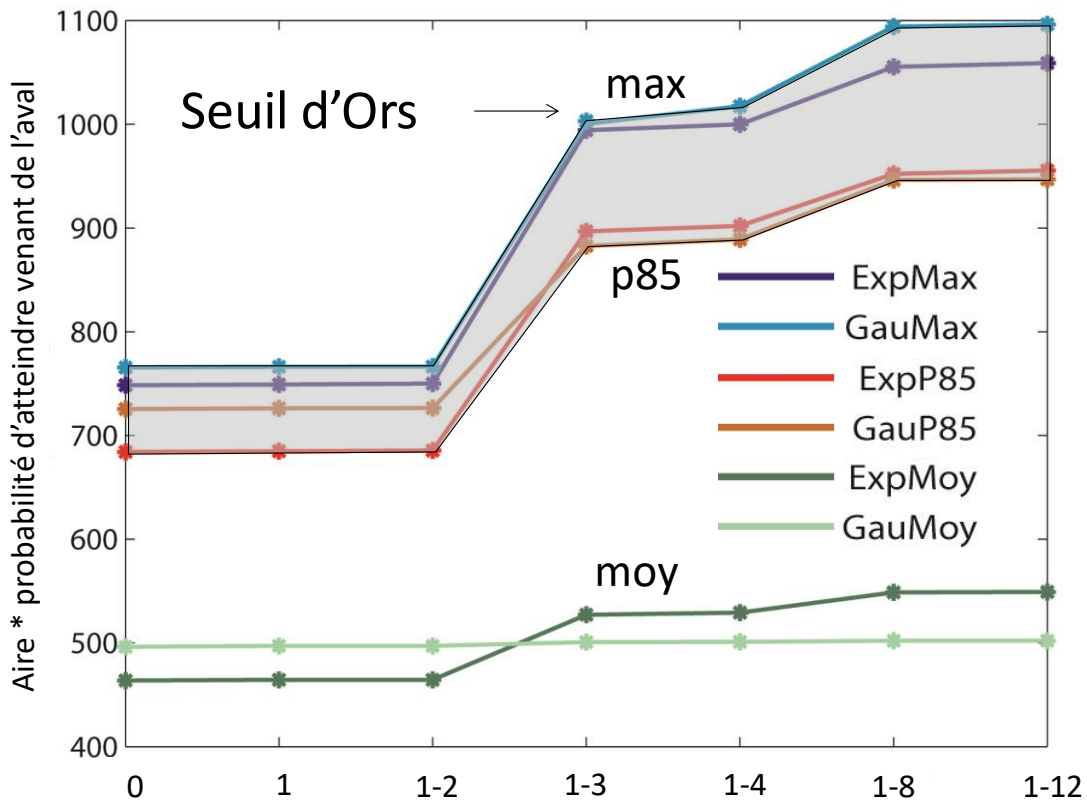


Figure 81 – Aires de frayères potentielles connectées (m²) en fonction des scénarios d'effacement de seuil.

La représentation longitudinale de chaque frayère avec sa probabilité moyenne d'être atteint(e) depuis l'aval fournit une indication complémentaire aux résultats précédents (Figure 82). La courbe du bas représente la situation actuelle : l'accessibilité décroît pour les frayères jusqu'à Ors ; en amont toute les frayères ont une accessibilité nulle. Avec l'effacement des 4 premiers obstacles, on observe un gain d'accessibilité pour le groupe de frayères situées juste en amont. On remarquera des accessibilités non nulles pour les frayères situées en amont des obstacles 5 et 6, qui ne sont pas infranchissables (Tableau 16). Un très léger gain est observé pour les frayères en amont de l'obstacle 10, qui n'est pas amélioré lors de la suppression des obstacles 5 à 8.

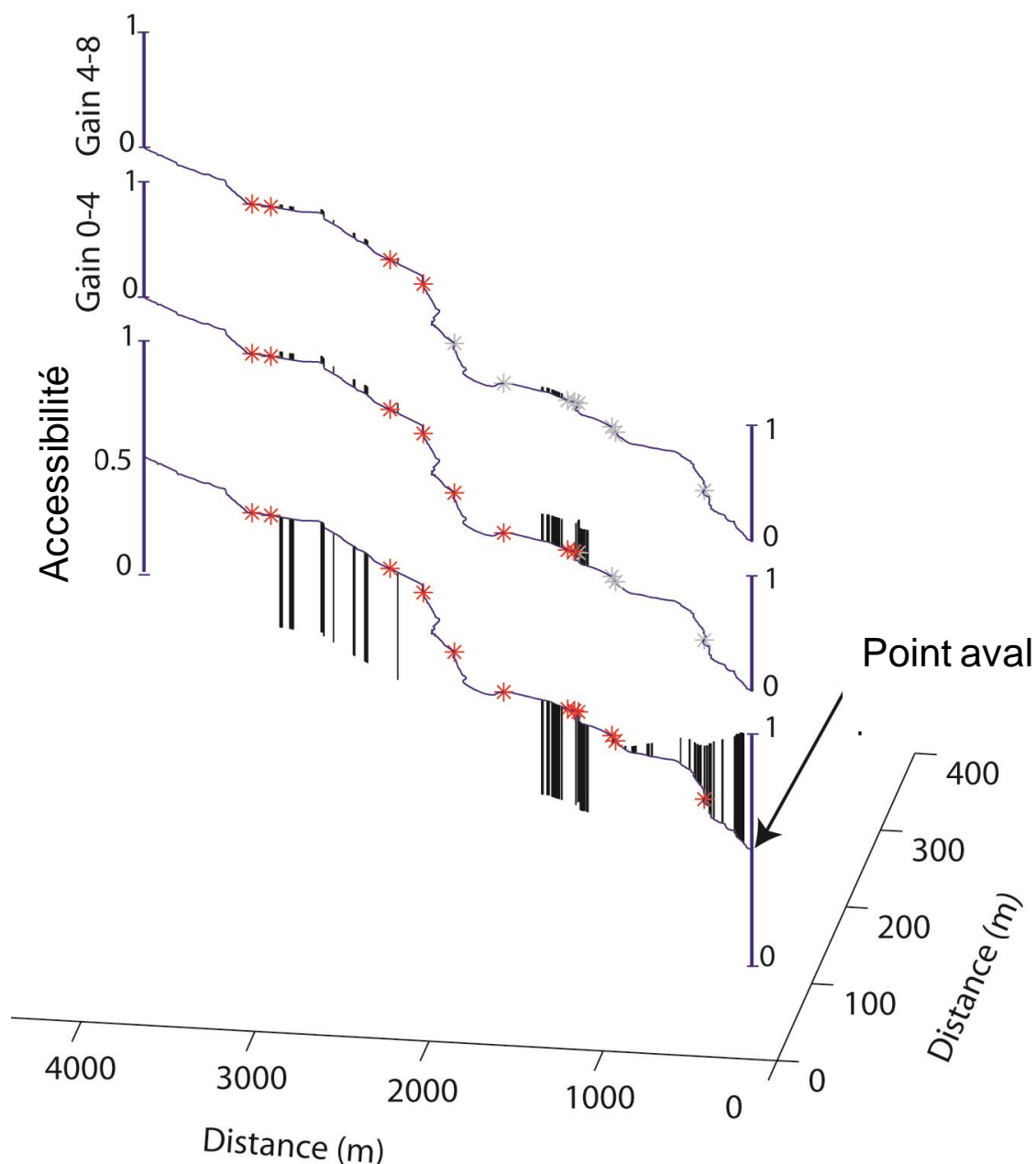


Figure 82 – Valeurs d'accessibilité des frayères depuis l'aval dans le scénario actuel (en bas) et gain d'accessibilité obtenu avec l'effacement des 4 premiers obstacles (milieu), puis des 4 obstacles suivants (haut). Les astérisques indiquent la position des obstacles, en rouge : obstacle présent, en bleu : obstacle effacé.

Cette analyse a permis d'identifier les seuils les plus pertinents à effacer en prenant en compte la position des frayères dans le linéaire. Ainsi, l'aménagement prévu du seuil d'Ors est celui qui offre un bénéfice maximal à l'accessibilité des frayères dans le secteur amont.

Dans l'optique d'évaluer si les truites peuvent facilement compléter l'ensemble de leur cycle de vie selon les différents scénarios d'aménagement, la connectivité des frayères à partir des habitats journaliers a été modélisée (Figure 83). On observe que les frayères potentielles de la Mérantaise sont globalement bien connectées aux habitats journaliers (accessibilité > 0,5), sauf en amont du seuil d'Ors (accessibilité = 0). Lorsque ce seuil est effacé, l'accessibilité à ce groupe de frayères est améliorée.

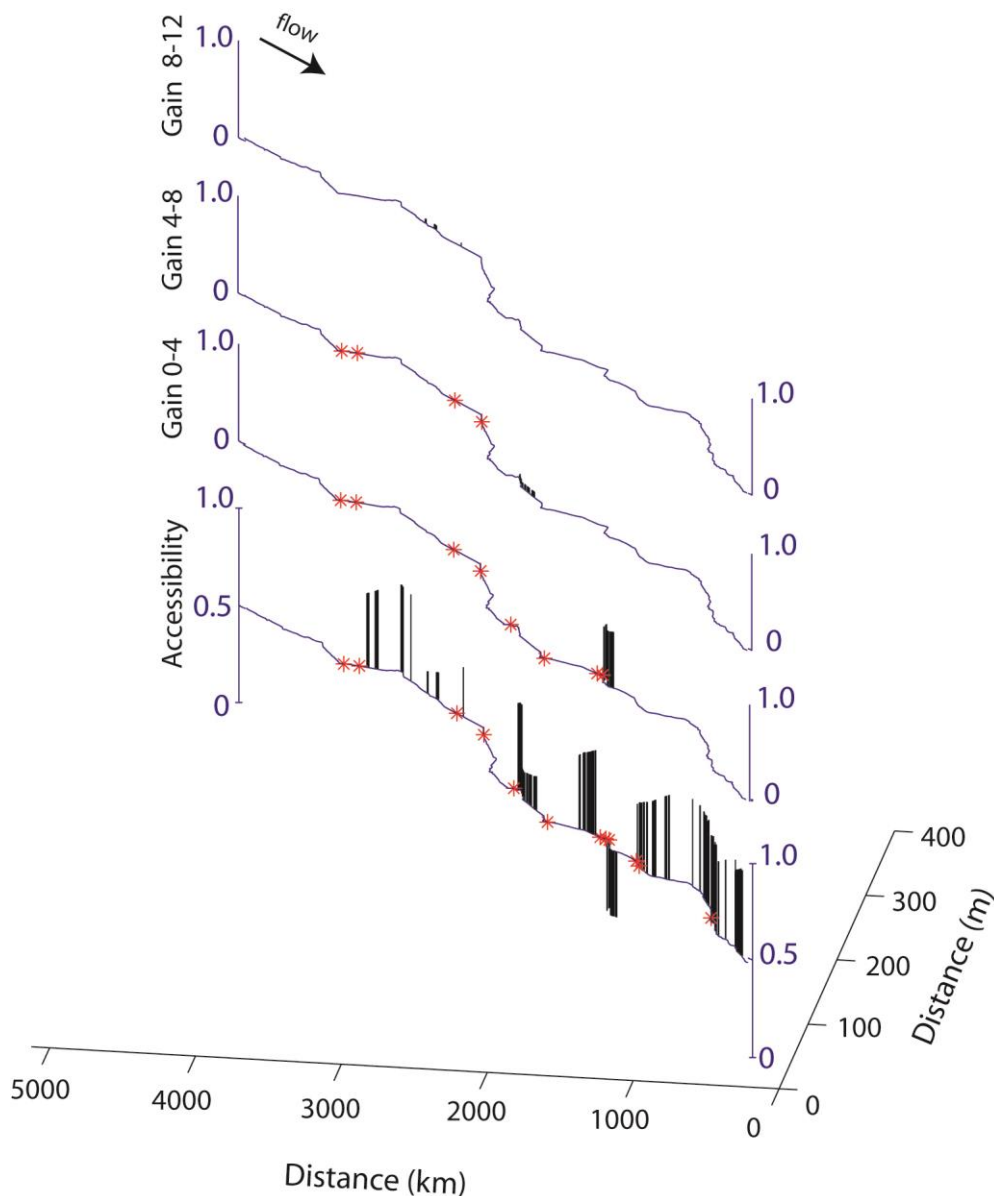


Figure 83 – Valeurs d’accessibilité des frayères depuis un habitat journalier dans le scénario actuel (bas) et gain d’accessibilité obtenu avec l’effacement des quatre premiers obstacles (milieu), puis des quatre obstacles suivants et des quatre derniers (haut). Les astérisques indiquent la position des obstacles en rouge.

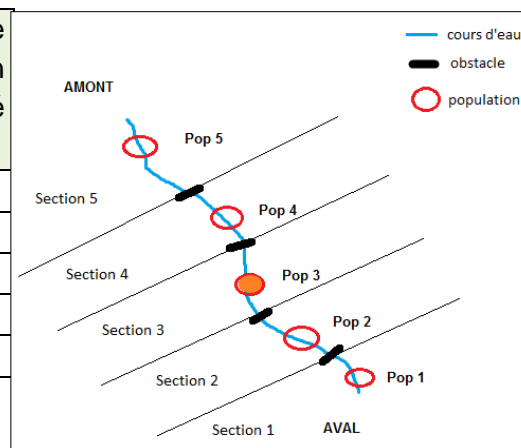
La méthode utilisée ici se révèle pertinente pour quantifier l’accessibilité des habitats nécessaires au cycle de vie des truites selon divers scénarios de rétablissement de la continuité écologique. Les résultats disponibles permettent d’établir un diagnostic fonctionnel préalable aux actions de restauration et fournissent une évaluation de l’effet cumulatif des obstacles. En termes de bilan sur le segment étudié de la Mérantaise, on constate que potentiellement les frayères sont assez bien connectées aux habitats journaliers et que l’effacement du seuil d’Ors permet de reconnecter tous ces habitats à l’aval du secteur qui est actuellement le seul occupé par des populations de truites.

11. Modélisation de la viabilité des populations de truites sur la Mérantaise

Des populations isolées de truite fario sont présentes sur certains secteurs du bassin, notamment sur l'Yvette amont et sur l'un de ses affluents, la Mérantaise. En utilisant une analyse de viabilité de population (PVA) on a cherché à évaluer les bénéfices de travaux de restauration de la continuité écologique de ces cours d'eau sur la viabilité des populations de truites fario (Chevalier, 2014). Plusieurs scénarios ont été modélisés à l'aide du logiciel VORTEX, ils ont été paramétrés à l'aide des connaissances sur les truites fario issues de la littérature. Des données de pêche électriques obtenues sur la Mérantaise, comparées à celle du bassin Seine Normandie ont été utilisées pour définir des densités de truites et calculer les tailles de populations (Tableau 18).

Tableau 18 – Tailles de populations utilisées pour la modélisation de viabilité de la metapopulation sur la Mérantaise.

N° Section	longueur (m)	largeur (m)	taille de population initiale	taille de population à capacité de charge
1	777,5	2,5	194,375	291,5625
2	848,1	2,5	212,025	318,0375
3	795	2,5	0	298,125
4	1175,8	2,5	0	440,925
5	1371,1	2,5	0	514,1625



11.1. Scénarios testés

Un premier scénario correspond au suivi de la situation actuelle si aucune restauration n'est réalisée. On modélise l'évolution des populations de truites fario, plus ou moins isolées entre elles par les ouvrages hydrauliques, sur 100 ans. Afin d'étudier tout particulièrement l'impact de la fragmentation des populations, on répète la simulation en faisant varier les couples de valeurs de migration amont/aval entre deux populations. Un deuxième scénario vise à suivre la recolonisation amont des cours d'eau après effacement ou aménagement des obstacles. Enfin, un troisième scénario, correspondant à la réintroduction de truites fario dans les zones en amont de la limite actuelle de remontée des truites, et ce dans le cas où l'on n'aménage pas les obstacles.

11.2. Résultats

Avec le scénario 1, on constate que la taille des deux populations diminue à mesure que les pourcentages de migration (fonction de la capacité de franchissement de l'obstacle) entre les deux populations baissent. Lorsque le taux de migration est de 10% aval/5% amont, 8% aval/4% amont, 6% aval/3% amont ou 4% aval/2% amont, les populations gardent des tailles à peu près stables, diminuant très légèrement au bout de 100 ans (Figure 84). Mais, en revanche, lorsque l'on a un taux de migration de 2% aval/ 1% amont, on constate une diminution de la taille des populations plus significative, qui est encore plus marquée dans les cas 1% aval/0% amont et 0% aval/0% amont. Ces exemples peuvent illustrer quelques cas d'obstacles présents sur la Mérantaise, certains restants franchissables par les individus les plus grands (ouvrage 60m en aval du seuil d'Ors, Figure 48). Le seuil d'Ors étant infranchissable et sans individus en amont, on est dans le cas 0% aval/0% amont. Compte tenu des tailles actuelles de populations, des populations de part et d'autre de ce seuil s'éteindraient à terme.

Scénario 1 Mérantaise_10-5 Population2
 Scénario 1 Mérantaise_6-3 Population2
 Scénario 1 Mérantaise_2-1 Population2
 Scénario 1 Mérantaise_0-0 Population2
 Scénario 1 Mérantaise_8-4 Population2
 Scénario 1 Mérantaise_4-2 Population2
 Scénario 1 Mérantaise_1-0 Population2

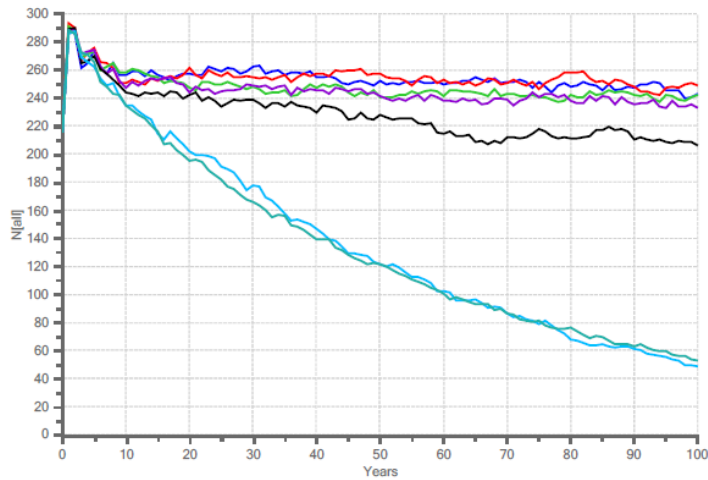


Figure 84 – Exemple d'évolution temporelle de la taille de la population en amont d'un obstacle (cas d'un effectif initial équivalent aux effectifs observés en aval) en fonction des valeurs de migration liées à la franchissabilité de cet obstacle.

Avec le scénario 2, les tailles de la métapopulation de truites fario sur la Mérantaise en fonction du temps et de la capacité de franchissement des obstacles ont été modélisées (Figure 85).

Scénario 2 Mérantaise_aménagement. barrages 1 Metapopulation
 Scénario 2 Mérantaise_aménagement. barrages 2 Metapopulation
 Scénario 2 Mérantaise_aménagement. barrages 3 Metapopulation
 Scénario 2 Mérantaise_aménagement. barrages 4 Metapopulation
 Scénario 2 Mérantaise_aménagement. barrages 5 Metapopulation

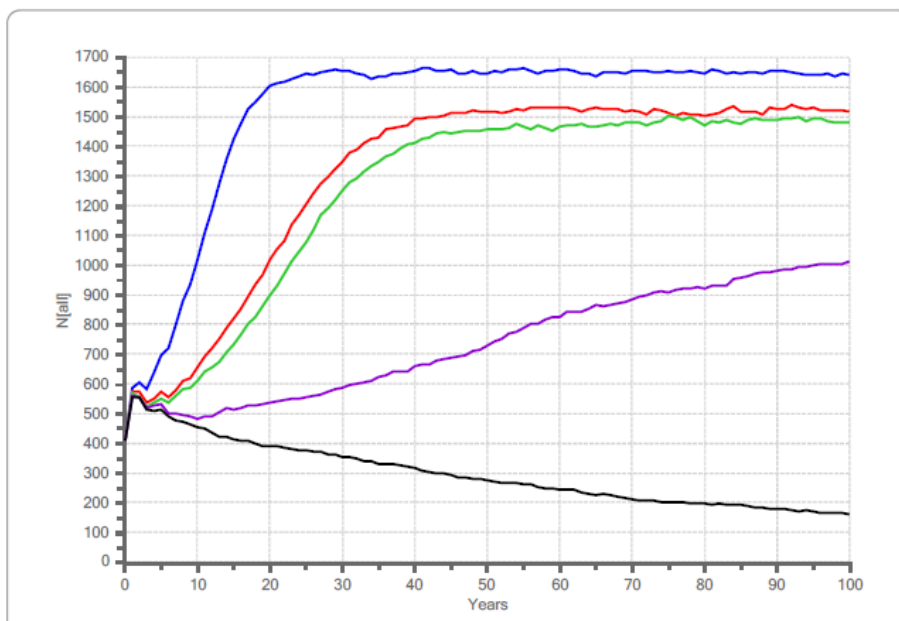


Figure 85 – Taille de la métapopulation de truites fario sur la Mérantaise en fonction du degré d'aménagement des obstacles.

Noir : pas d'aménagement des obstacles (situation actuelle) migration aval 0.5% / migration amont 0%

Violet : aménagement tel que migration aval 1% / migration amont 0.5%

Vert : aménagement tel que migration aval 2.5% / amont 1.25%

Rouge : aménagement tel que migration aval 5% / amont 2.5%

Bleu : aménagement tel que migration aval 10% / amont 5%

S'agissant de la taille de la métapopulation, on constate une diminution progressive dans le cas où les obstacles ne sont pas aménagés pour permettre le passage des poissons. En revanche, la taille de la métapopulation augmente sensiblement avec l'amélioration de la franchissabilité des obstacles. Le scénario 2, qui évalue la colonisation amont du cours d'eau en fonction de la franchissabilité des obstacles (dépendante de l'aménagement des obstacles) met en évidence l'intérêt d'aménager les obstacles ou de les supprimer en termes d'augmentation de la taille de la métapopulation (*Figure 85*). Plus la franchissabilité de l'obstacle de l'aval vers l'amont (montaison) est importante, plus les individus vont pouvoir coloniser l'amont du cours d'eau. La diminution de la taille de la métapopulation est nette lorsque les individus ne peuvent que très difficilement remonter le cours d'eau et franchir les obstacles.

Un troisième scénario a été modélisé, correspondant au cas où une réintroduction de truites fario dans les zones en amont sur la Mérantaise est privilégiée à un effacement des obstacles actuels. Le modèle simule la réintroduction de 25 truites fario dans chacun des trois secteurs en amont de l'aire de répartition actuelle de la truite sur le cours d'eau (secteurs 3, 4 et 5). Lorsque l'on s'intéresse à l'évolution en fonction du temps du nombre d'individus des différentes populations de la Mérantaise, on constate que la viabilité des populations sur les secteurs en amont n'est pas assurée. En effet, la taille des populations tend à diminuer au cours du temps. Après une phase d'augmentation d'effectif des populations au cours des 15 premières années, il y a une diminution progressive au cours du temps des effectifs des populations où des truites ont été réintroduites. Cela se confirme si l'on observe la probabilité de survie de ces populations, qui est d'autant plus faible plus la population est située vers l'amont. Les populations de truites fario 1 et 2 ont une probabilité de survie bien supérieure (respectivement 95% et 88%) à celle des populations 3, 4 et 5 où des réintroductions ont été effectuées (respectivement 70%, 45% et 18%) (*Figure 86*). Ce scénario met en évidence le fait que la réintroduction de truites fario est une option qui n'assure pas un maintien durable des populations. Dans un tel cas de figure, il serait nécessaire de répéter l'opération de réintroduction à intervalles de temps réguliers.

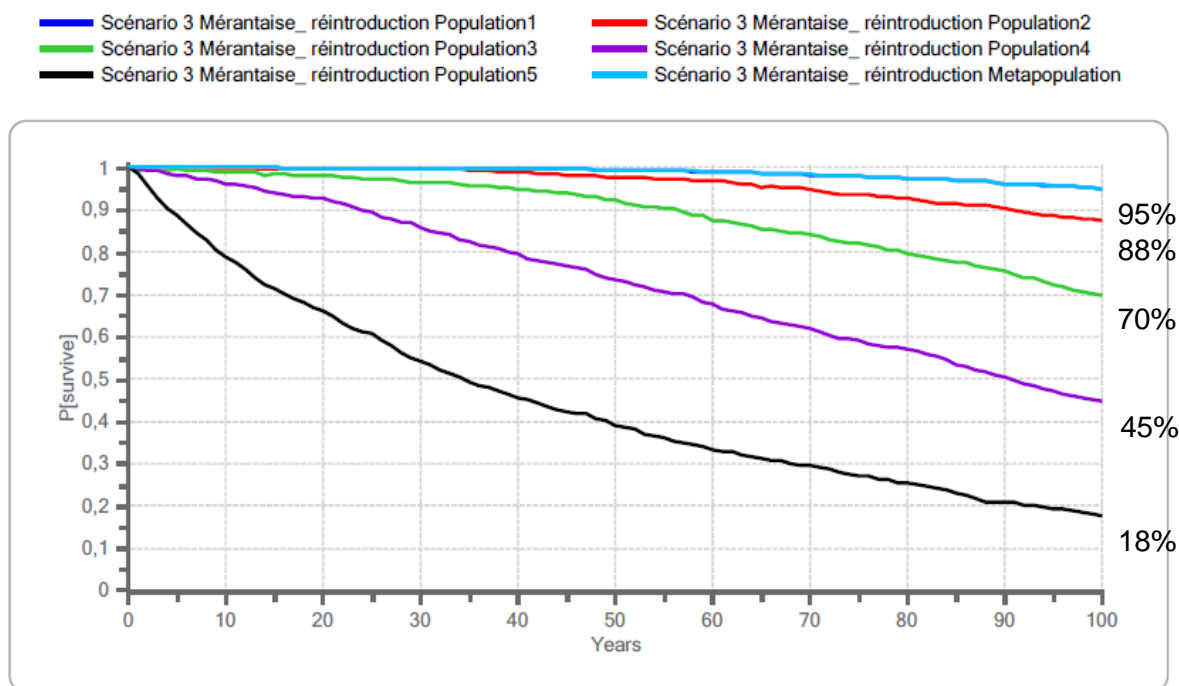


Figure 86 – probabilité de survie des populations en fonction du temps.

11.3. Discussion

Cette application de l'AVP aux populations de truites fario sur le bassin versant de l'Yvette a permis de mettre en avant l'impact de l'isolement des populations par de nombreux obstacles transversaux. Le fractionnement des cours d'eau peut être clairement préjudiciable au maintien de la métapopulation ; la dynamique de dispersion des individus entre les populations étant déterminante pour la persistance de ces populations.

La modélisation sous VORTEX de la dynamique des populations de truite fario et des différents scénarios de gestion de réhabilitation de la continuité écologique des cours d'eau a mis en évidence les bénéfices d'un aménagement, voire d'une suppression des obstacles pour les populations. Les sorties du modèle pour les différents scénarios ont montré que le maintien des populations est fortement dépendant des possibilités de migration entre les populations.

Les obstacles transversaux sur le lit du cours d'eau limitent la taille des populations et les dynamiques de dispersion et de migration des individus entre les zones d'habitat et les zones de frayère. Plus la fragmentation de l'habitat est importante et les populations isolées entre elles, plus la taille de ces populations diminue. Les populations sont alors plus vulnérables aux menaces de catastrophes (pollution, événements majeurs : étiage sévère, inondation, ...). Elles ont par conséquent une probabilité de survie plus faible, pouvant être inférieure à 50%, c'est-à-dire lorsque le franchissement des obstacles vers l'amont n'est plus possible.

L'extension et le maintien de populations de truites fario en amont des cours d'eau est fortement compromis par la présence de barrages, seuils et autres obstacles à la circulation piscicole. Le franchissement des obstacles tels que les seuils étant souvent possible uniquement de l'amont vers l'aval, on a un maintien des populations moindre en amont par rapport aux populations localisées en aval. La probabilité de survie d'une population située en amont est inférieure à celle d'une population en aval lorsque le réseau hydrographique est

fragmenté. En faisant diminuer le pourcentage de franchissabilité des obstacles, on accentue notablement cette baisse des effectifs au point de menacer la survie des populations.

D'après les résultats du modèle sur la base de la situation actuelle, le maintien des populations pour les 100 prochaines années est fort probable. Cependant, les populations sont de taille relativement réduites et sont isolées, une tendance à la diminution des effectifs des populations ressort sur le long terme, ce qui ne fait pas de la situation actuelle une situation favorable à la viabilité des populations de truite.

Les différents scénarios modélisés sous VORTEX ont permis d'estimer l'efficacité des choix de gestion sur la viabilité des populations de truite fario. Tout d'abord, l'aménagement des obstacles actuels par abaissement de la hauteur de seuil ou leur suppression semblent être des options préférables à la réintroduction de truites fario dans les zones qui ne lui sont plus accessibles (en amont). Les résultats du modèle pour la réintroduction de truites ne permettant pas un maintien des populations dans les zones en amont (*Figure 86*).

12. Conclusion

Le suivi, avant travaux, des deux projets de restauration de la continuité écologique sur l'Aulne et la Mérantaise comprend un état initial hydromorphologique et biologique réalisé sur les années 2011-2013. Les protocoles de mesures hydromorphologiques, autour de deux approches complémentaires : une approche stationnelle et une approche longitudinale ont permis de caractériser l'état hydromorphologique des deux cours d'eau à des échelles différentes. L'ajout d'une étude diachronique de différents types de documents historiques (cartes et plans anciens, rapports d'ingénieurs, témoignages, croquis des ouvrages hydrauliques) permet de resituer les évolutions dans le temps long.

Les protocoles d'évaluation biologique se sont avérés très complémentaires pour comprendre la dynamique de présence des espèces, notamment l'inventaire des frayères, le suivi des mouvements d'individus matures et l'échantillonnage en fin de saison des jeunes de l'année. L'analyse complémentaire des faciès, du profil en long et des distributions spatiales des poissons et leurs mouvements met en évidence les secteurs les plus favorables à l'espèce : (i) habitat des jeunes de l'année, (ii) distribution spatiale des frayères et (iii) gîtes de croissance des adultes. L'analyse des mouvements par télémétrie permet de mettre en évidence l'existence d'une fidélité aux gîtes, de préciser l'ampleur des mouvements lors de la migration de reproduction mais aussi le comportement face aux obstacles naturels, de type embâcle, ou artificiels comme les deux seuils étudiés.

La multidisciplinarité des approches souligne nettement l'influence de la morphologie et de l'hydrologie sur les distributions des adultes de truites, sur la réussite du recrutement de l'année et sur la composition des peuplements d'invertébrés.

12.1. Bilan sur la Mérantaise

Aujourd'hui, l'état hydromorphologique de la Mérantaise est l'héritage de plusieurs évolutions historiques. Tout d'abord, celle de son exploitation comme production d'énergie pour assurer le fonctionnement des moulins et usines hydrauliques mis en place sur son cours. Du Moyen-

Age, semble-t-il, jusqu'au début du XX^{ème} siècle, la rivière a connu des modifications anthropiques importantes (dérivation du lit mineur, lit perché en bas de versant, construction de seuil, de chutes d'eau, ...) qui ont eu comme conséquence d'altérer les conditions de fonctionnement naturel du cours d'eau.

A partir de la première moitié du XX^{ème} siècle, avec l'abandon des moulins, la Mérantaise a connu une période de remise à l'état initial de son tracé (fond de vallée remis en eau, abandon des bras d'aménée d'eau perchés). Cette époque coïncide avec le développement massif de l'urbanisation du sud-ouest de Paris (Ville Nouvelle de Saint- Quentin-en-Yvelines). La vallée de la Mérantaise a été en partie épargnée par cette extension urbaine, cependant, les conséquences de celles-ci se font sentir. Les pressions de l'urbanisation en tête de bassin versant (Voisin-le-Bretonneux et les communes voisines) ont des effets sur les conditions hydromorphologiques de la rivière : ruissellement augmenté, apports sédimentaires des versants diminués, rejets plus importants d'eau dans le cours d'eau.

On observe actuellement une incision forte (peut - être moins active aujourd'hui), qui se marque par des berges très hautes, un lit mineur très bas, une absence de plaine d'inondation et un débit plein bord (Qpb) de récurrence estimé à 100 ans. De plus l'incision est généralement plus marquée en aval des seuils, en particulier à partir du seuil d'Ors. Les obstacles hydrauliques déséquilibrent la pente du lit de la Mérantaise et provoquent des processus d'érosion régressive ou progressive. Le profil en long met en évidence l'influence des seuils sur l'existence de secteurs plus ou moins profonds. Notamment l'effet des passages du réseau de collecteurs dans le fond du lit est important du fait de l'enfoncement du lit mineur, cela crée des chutes supplémentaires.

Le bilan des inventaires invertébrés montre un secteur de bonne qualité présentant des taxons polluosensibles, avec semble-t-il une stabilité dans le temps. La diversité faunistique indique des habitats relativement diversifiés à l'aval comme à l'amont.

Les inventaires des habitats piscicoles montrent l'existence de secteurs assez contrastés, à l'aval du seuil d'Ors, le lit mineur est assez large, peu profond (inexistence de mouilles) et avec peu d'abris. Plus à l'aval, l'alternance de radiers et de mouilles profondes, un lit plus étroit semble favorable à l'existence des frayères, à la présence des jeunes de l'année et à l'observation des gîtes de plusieurs poissons sur la saison de croissance. Le secteur des ponts de pierre présente une zone assez courante puis des radiers avec abris et quelques mouilles ; ce secteur est riche en frayères.

L'inventaire du peuplement de poissons confirme l'absence du chabot sur le secteur.

La population de truites présente une croissance importante, les individus matures présentent des marques de reproduction sur leurs écailles et des frayères sont observées chaque année. On y trouve des jeunes de l'année et cela même dans une année de forte hydrologie comme 2013, cependant les densités restent faibles. La répartition des truites est hétérogène sur le secteur et elles sont absentes en amont du seuil.

Les mouvements observés font apparaître qu'une partie des individus possèdent des lieux de résidence préférentiels et de tailles relativement limitées. Au moment de la reproduction, les mouvements sont de plus grande ampleur et certains tentent des migrations vers l'amont.

12.2. Bilan sur l'Aulne

L'état hydromorphologique de l'Aulne montre un secteur relativement préservé, avec un cours d'eau dynamique dont le débit de plein bord peut être atteint plusieurs fois dans l'année. L'amont du seuil de Béchereau est un bief de moulin dont la morphologie est artificielle et le substrat monotone : sable de fontainebleau ; l'aval présente des granulométries plus variées

et une sinuosité marquée avec alternance de secteurs aux faciès hétérogènes, favorables à la présence et à la fraye des truites.

Le bilan invertébrés fait apparaître un peuplement riche en taxons polluo-résistants à l'amont et peu diversifié du fait de la monotonie de l'habitat. L'aval est de meilleure qualité avec présence des Ephéméridae.

L'inventaire du peuplement de poissons montre la présence du chabot et d'espèces d'eau calme, sans doute en lien avec la présence d'un étang. La répartition des truites est hétérogène sur le secteur et elles sont absentes en amont du seuil. La population de truites présente une croissance importante, les individus matures présentent des marques de reproduction sur leurs écailles et des frayères sont observées chaque année ; cependant les densités restent faibles. On y trouve des jeunes de l'année mais de façon irrégulière puisqu'en 2013, un seul individu a été trouvé sur l'ensemble du linéaire prospecté.

Les mouvements observés font apparaître qu'une partie des individus possèdent des lieux de résidence préférentiels et de tailles relativement limitées. Au moment de la reproduction, les mouvements sont de plus grande ampleur et certains tentent des migrations vers l'amont, notamment jusqu'au seuil de Béchereau.

Le dossier administratif concernant les projets de restauration est en cours de finalisation et relève du Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse. Les travaux devraient se réaliser en 2016.

AFNOR (2009) *Qualité écologique des milieux aquatiques - Qualité de l'eau - Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes*, Association Française de normalisation, Norme Expérimentale T 90-333,

Baudry J, Boussard H, Schermann N, 2005, *Chloe 3,0 : Freeware of multi-scales analyses on ASCII raster files*, Rennes, INRA, SAD-Armorique, <http://www6.rennes.inra.fr/sad/Outils-Produits/Outils-informatiques/Anaqualand>

Circulaire DE/MAGE/BEMA 07/n°4 (2007) *Protocole de prélèvement et de traitement des échantillons des invertébrés sur le réseau de contrôle de surveillance*, Bulletin officiel du 11 avril 2007,

Tachet H., Richoux P., Bournaud M, & Usseglio-Polatera P, (2000) *Invertébrés d'eau douce, Systématique, biologie, écologie*, CNRS EDITIONS, Paris, 587pp,

Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques, J.R, Malavoi, Y. Souchon. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (2002) 365/366 : 357-372

Toth, G., Gaspari, Z. and Jurka J., 2000, *Microsatellites in different eukaryotic genomes: survey and analysis*, *Genome Research*, 10, 967-981,

Tautz, D, 1989, *Hypervariability of simple sequences as a general source of polymorphic DNA markers*, *Nucleic Acids Research*, 17, 6463-6471,

Rodriguez, H., Geistlinger, J., Berlyn, G., Kahl, G, and Weising, K, 2000, *Characterization of novel microsatellite loci isolated from the tropical dioecious tree Simarouba amara*, *Primer Notes, Molecular Ecology*, 9, 489-504,

Annexe 1 : Protocole de lever topographique
(Caractérisation hydro morphologique des cours d'eau à l'échelle de la station)

On se place ici dans la phase opérationnelle de la mesure topo, le choix de l'emplacement de la station (devant permettre de couvrir un linéaire de tronçon homogène d'au moins 15 fois la largeur à plein bord) ayant été fait au préalable.

Préparation :

Estimation grossière de la largeur moyenne à plein bord: effectuer quelques mesures de la largeur à plein bord (avec un décamètre ou un distancemètre) en différents points du linéaire de la station de façon à avoir une estimation de la largeur moyenne, qui sera prise comme distance entre les transects ; cette estimation n'a pas besoin d'être très précise.

Positionnement et marquage des transects : les transects sont placés à intervalles réguliers, espacés d'une fois la largeur plein bord moyenne (mesure de la distance effectuée au décamètre, en prenant en compte autant que possible la sinuosité). A chaque transect est associé un repère topo sous la forme d'un piquet de bois (d'une trentaine de cm de haut) muni d'une vis cruciforme sur le dessus. Ces piquets servant de repère pour les levés futurs, il faut qu'ils restent visibles au-dessus du sol mais qu'ils soient néanmoins solidement ancrés, et il est préférable qu'ils ne soient pas placés à portée directe des promeneurs, des pêcheurs ou du bétail.

Attention : n'enfoncer définitivement le piquet que lorsqu'on a déterminé précisément l'emplacement du transect (en cas de présence d'arbre ou autre singularité empêchant les mesures, on peut déplacer quelque peu le transect vers l'amont ou vers l'aval) et lorsqu'on est sûr qu'il sera visible du tachéo.

Les transects sont numérotés de 1 à 15 et identifiés à l'aide d'étiquettes montées sur sardines, au moins sur l'une des berges. Ces étiquettes ont plusieurs utilités : toujours savoir sur quel transect on se situe en cours de manip, avoir les numéros de transect apparents sur les photos, mais aussi aider à dessiner le niveau « bord de berge » sur la station (cf ci-dessous).

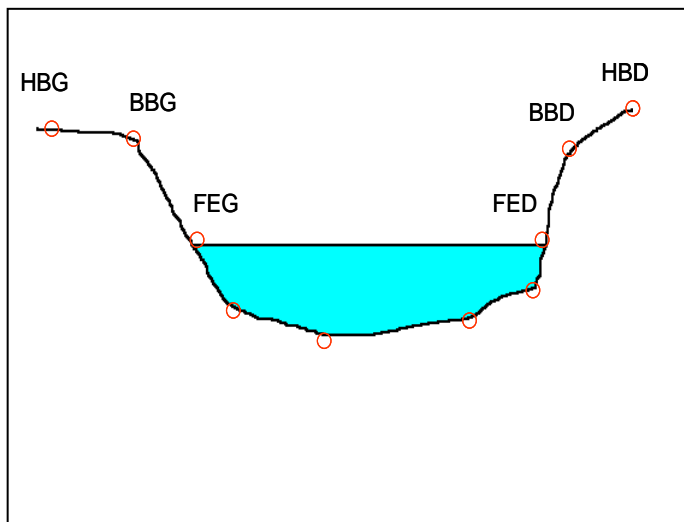
Positionnement et mise en station du tachéomètre : il doit être positionné à un endroit d'où le maximum de transects soient visibles (notamment les piquets-repères, qu'il est impératif de relever), au besoin il sera déplacé en cours de lever.

Trois points fixes sont également relevés, repérés à la bombe de peinture ou avec un clou de géomètre. Ces repères doivent rester en place après les mesures de façon à pouvoir être relevés lors des mesures topographiques futures.

Un schéma grossier de la station est dessiné à la main, où l'on note notamment le sens du courant et les emplacements des points de repères.

Lever topographique :

Lever de la topographie d'un transect :



HBG: haut de berge gauche
HBD: haut de berge droit
BBG: bord de berge gauche
BBD: bord de berge droit
FEG: fleur d'eau gauche
FED: fleur d'eau droit
Autres points: chenal

Les différents points de levé topographique.

Ce sont en priorité les points correspondant à des changements de pente dans la géométrie de la section qui sont relevés (cf. Figure ci-dessus), avec une attention particulière pour les points dits "Fleur d'eau" (FED et FEG, points de contact entre la rive et la surface libre de l'écoulement qui serviront à déterminer le niveau d'eau) et les points dits "bords de berge" (BBD et BBG) correspondant aux points à partir desquels on considère que la rivière déborde de son lit mineur, qui serviront à déterminer le débit de plein bord.

Les points « bord de berge » ne sont pas faciles à déterminer partout et on peut parfois hésiter entre plusieurs niveaux : pour lever les doutes et choisir le même niveau BB sur tous les transects, il est conseillé de regarder en amont et en aval pour positionner les points BB sur chaque transect. Il faut en quelque sorte tracer virtuellement une ligne de niveau « bord de berge » tout le long de la station. Les étiquettes portant les numéros de transect peuvent permettre de matérialiser cette ligne de niveau « bord de berge » si on les place sur les points BB de chaque transect avant de commencer la topo (avec ajustements successifs).

Lever topographique du profil en long :

En complément des transects, on lève un profil en long détaillé du fond du lit sur toute la station, pour décrire plus précisément la variabilité longitudinale (succession de faciès). Le porteur de mire avance dans l'axe de l'écoulement et prend des points au fur et à mesure, la fréquence des points dépendant des variations du fond : l'objectif est de bien décrire les variations de pente longitudinale, les points les plus bas et les plus hauts...

Lever d'un point, en pratique :

Deux personnes au minimum sont nécessaires, l'une au tachéomètre, l'autre à la canne. Pour éviter de monter-descendre sans cesse de la berge dans le lit mouillé, il peut y avoir 2 ou 3 personnes à la canne : une dans le lit mouillé et une sur la berge. Le tachéomètre pouvant être situé à une assez grande distance de la rivière, les opérateurs communiquent à l'aide de talkie-walkie.



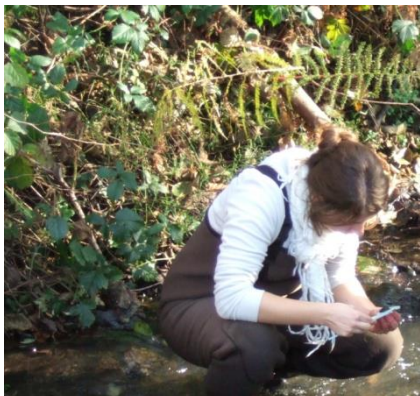
Le porteur de la canne positionne la canne sur le point à lever en s'assurant que celle-ci soit bien verticale (une nivelle sphérique est montée à cet effet sur la canne).

Il annonce ensuite le numéro du transect, le type de point levé (piquet, BBG...) et la hauteur de canne (correspondant à la longueur entre la base de la canne, point que l'on veut lever, et le prisme que l'opérateur au tachéomètre vise). La hauteur de canne peut être modifiée en fonction des besoins en cours de levé, elle est donc graduée.

L'opérateur au tachéomètre peut ensuite viser le prisme et lancer la mesure. Il informe le porteur de canne que la mesure a bien été faite et qu'il peut passer au point suivant.

Granulométrie :

Cela consiste en la mesure du substrat représentatif du tronçon étudié. Concrètement, les prélèvements doivent être effectués en fonction de la présence des différents faciès sur ce tronçon. Pour cela, il faut estimer le pourcentage de recouvrement de ces faciès par rapport à la surface total du tronçon étudié. Cents éléments sont mesurés, le nombre d'éléments mesurés par faciès correspond donc au chiffre du pourcentage calculé précédemment.



Lorsque le substrat est très fin et homogène sur l'ensemble du site (cas de l'Aulne sur la station amont), on effectue un prélèvement qui est ensuite trié par tamisage au laboratoire.

Les mesures sont relevées selon les classes de taille suivantes :

Material	Size Range (mm)
silt/clay	0 - 0.062
very fine sand	0.062 - 0.125
fine sand	0.125 - 0.25
medium sand	0.25 - 0.5
coarse sand	0.5 - 1
very coarse sand	1 - 2
very fine gravel	2 - 4
fine gravel	4 - 6
fine gravel	6 - 8
medium gravel	8 - 11
medium gravel	11 - 16
coarse gravel	16 - 22
coarse gravel	22 - 32
very coarse gravel	32 - 45
very coarse gravel	45 - 64
small cobble	64 - 90
medium cobble	90 - 128
large cobble	128 - 180
very large cobble	180 - 256
small boulder	256 - 362
small boulder	362 - 512
medium boulder	512 - 1024
large boulder	1024 - 2048
very large boulder	2048 - 4096

Source et réf biblio : protocole mis au point dans l'étude Cemagref / AESN sur les cours d'eau de la craie (cf. rapport d'étude), dérivé de celui établi dans la thèse d'Oldrich Navratil (thèse HHLV 2005). Dave Rosgen (1942), River Stability Field Guide Forms and Worksheets

Annexe 2 **Fiches récapitulatives par stations**

Les fiches « station » regroupent les résultats des mesures topographiques et granulométriques effectuées sur les sites étudiés. Elles sont constituées de trois parties distinctes.

- La première concerne les caractéristiques générales du site. La pente du fond correspond à la pente moyenne du fond du cours d'eau calculée suite au levé topographique, elle est visible sur le graphique du profil en long. Le D50 concerne la granulométrie, il correspond au diamètre en dessous duquel se trouve 50% de l'échantillon prélevé. Quelques valeurs caractéristiques à plein bord calculées à partir des données topographiques mesurées sur le site sont également présentées.
- La seconde partie présente le profil en long et la morphologie de la station. Les abréviations utilisées sont identiques à celles de la carte. On peut notamment y voir le profil du fond du cours d'eau (courbe « Z fond »), ainsi que la ligne de plein bord « moyenne » (Linéaire PB) qui correspond à la droite de régression sur les points « bord de berge » les plus bas. Un profil en travers figure sur chaque fiche à titre d'exemple.
- La troisième partie présente la carte effectuée avec les données topographiques relevées sur le terrain ainsi que des photos du site étudié.

Département : 78

Coord (Lamb II ét.): 573931.312-2403581.876

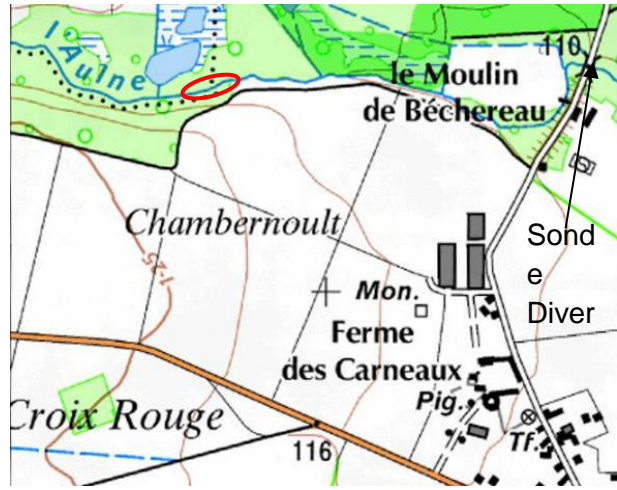
Taille BV: 32.2 km²

Pente fond : 0.19 %

Distance entre transects : 4 m

D₅₀ : 0.17 mm

Station hydro : sonde Diver installée au niveau du pont de Béchereau



Caractéristiques à plein bord :

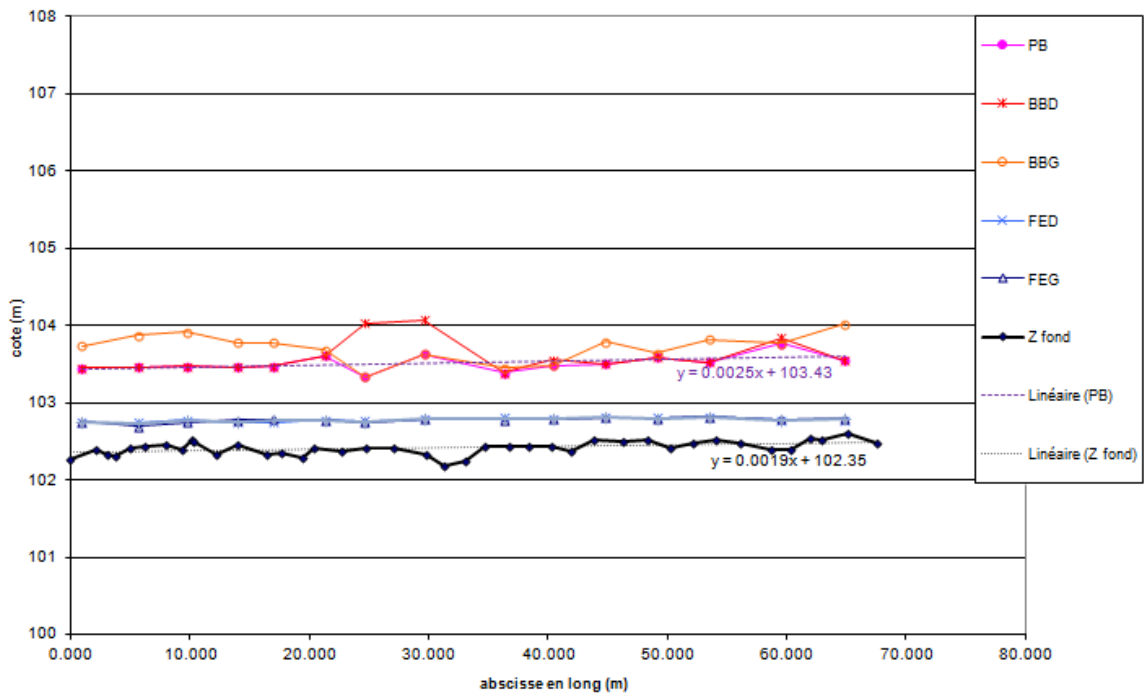
Q : 1 m³/s

Largeur au miroir: 4.8 m

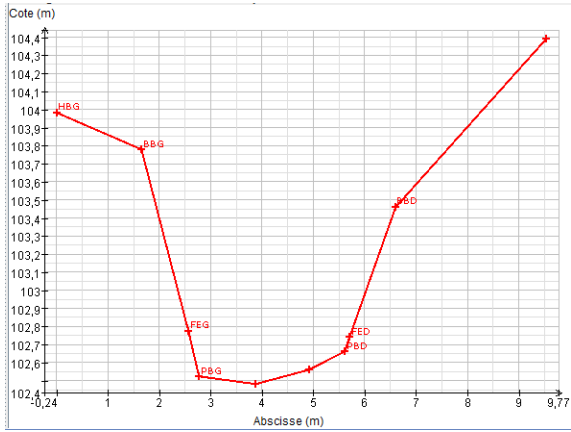
Hauteur d'eau moyenne : 0.70 m

Profil en long et morphologie de la station :

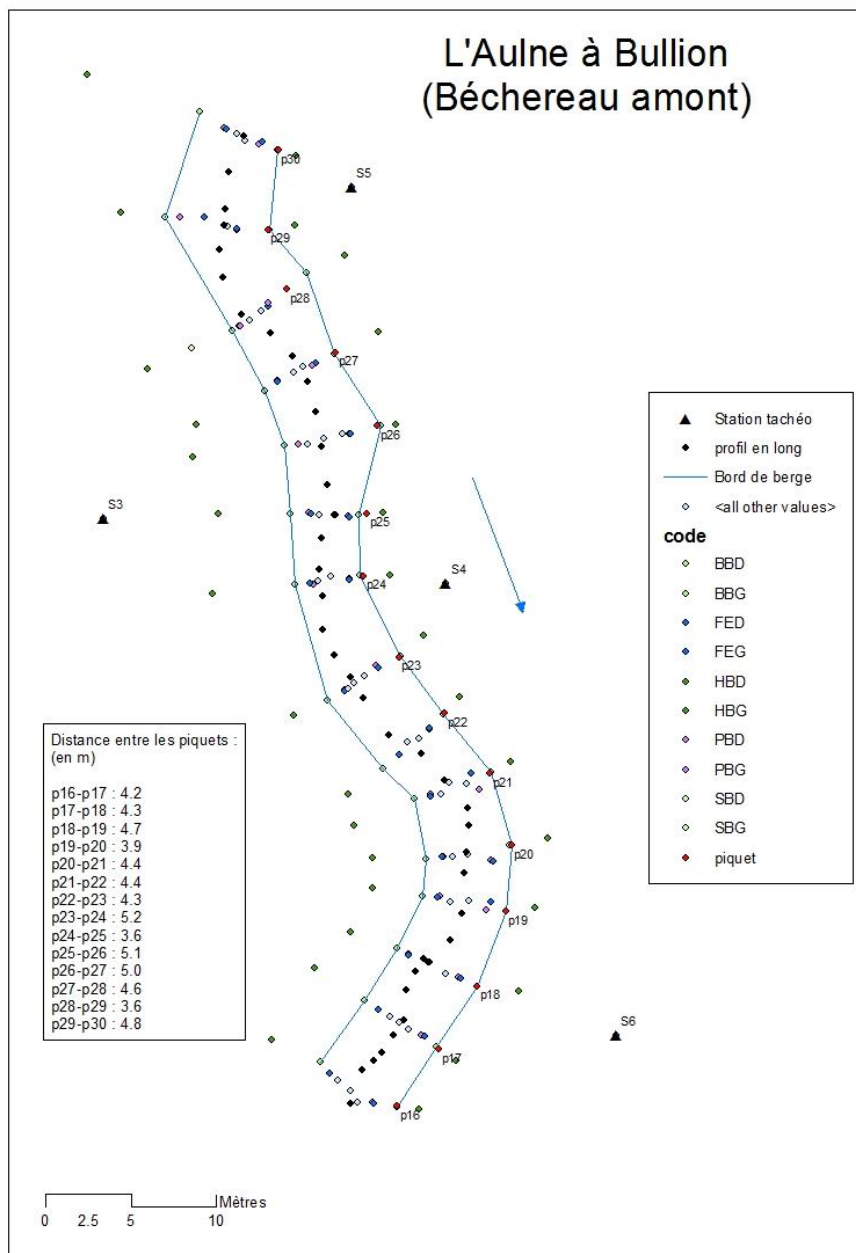
Observé le 05/12/2011 à Q = 0.055



Le profil en travers numéro 19 :



L'Aulne à Bullion (Béchereau amont)



Département : 78

Coord (Lamb II ét.): 574533.284-2403524.133

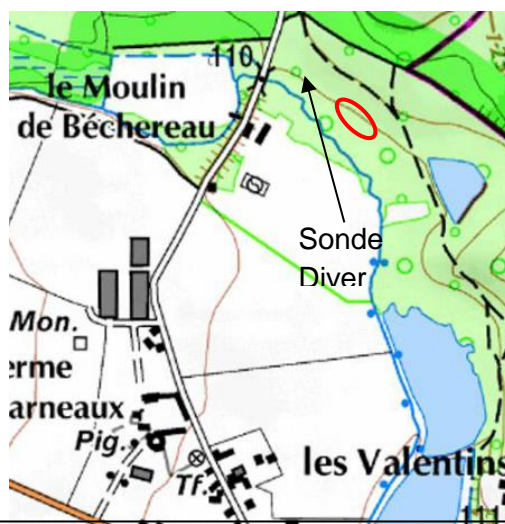
Taille BV: 36.3 km²

Pente fond : 0.75 %

Distance entre transects : 4 m

D₅₀ : 0.5 mm

Station hydro : sonde Diver installée au niveau du pont de Béchereau



Caractéristiques à plein bord :

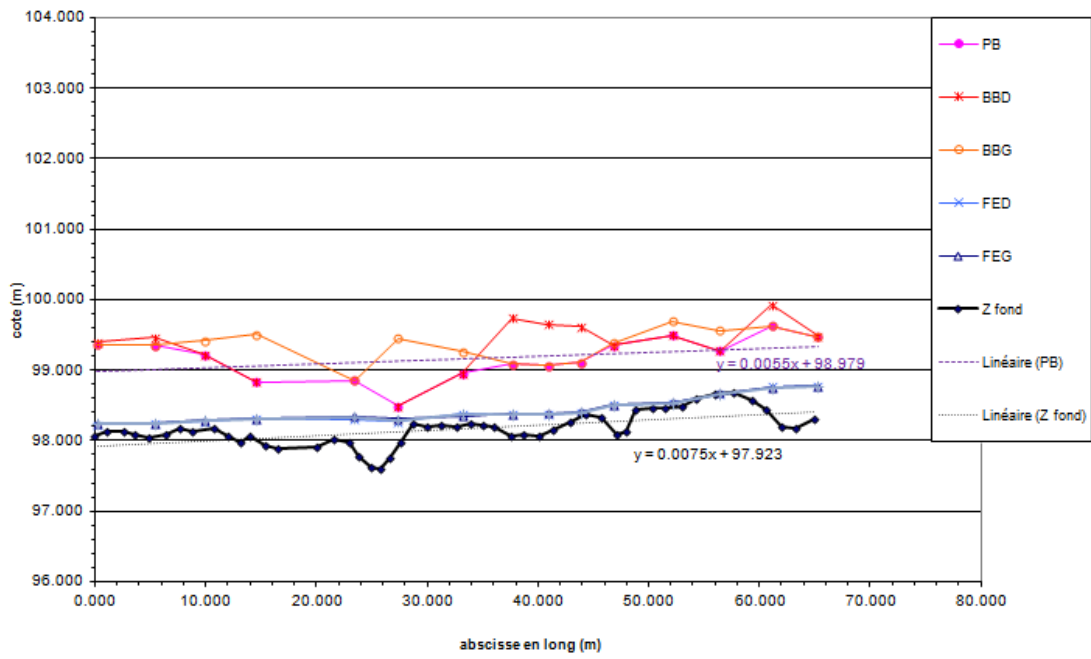
Q : 2 m³/s

Largeur au miroir : 5.2m

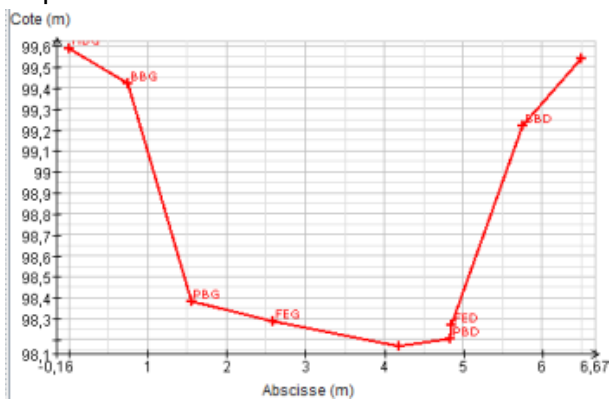
Hauteur d'eau moyenne : 0.70 m

Profil en long et morphologie de la station :

Observé le 22/11/2011 à Q = 0.030 m³/s



Le profil en travers numéro 03 :



L'Aulne à Bullion (Béchereau aval)

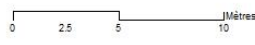
Distance entre les piquets :
(en m)

p1-p2 :	5.2
p2-p3 :	4.7
p5-p6 :	1.5
p6-p7 :	4.1
p7-p8 :	5.0
p8-p9 :	4.2
p9-p10 :	6.7
p10-p11 :	5.5
p11-p12 :	4.5
p12-p13 :	4.4
p13-p14 :	4.7
p14-p15 :	4.2

- ▲ Station tachéo
- ◆ profil en long
- Bord de berge
- ◇ <all other values>

code

- ◇ BBD
- ◇ BBG
- ◇ FED
- ◇ FEG
- ◇ HBD
- ◇ HBG
- ◇ PBD
- ◇ PBG
- ◇ SBD
- ◇ SBG
- ◆ piquet



Département : 78

Coord (Lamb II ét.): 582438.967-
2414632.596

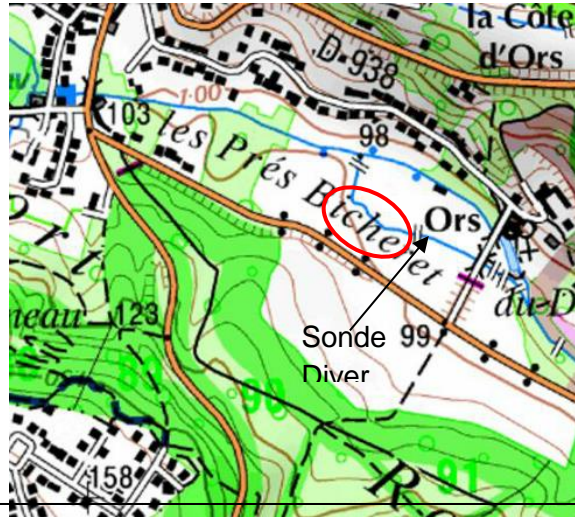
Taille BV: 23.1 km²

Pente fond : 0.41 %

Distance entre transects : 5 m

D₅₀ : 0.9 mm

Station hydro : sonde Diver installée sur le
pont des Prés Bicheret



Caractéristiques à plein bord :

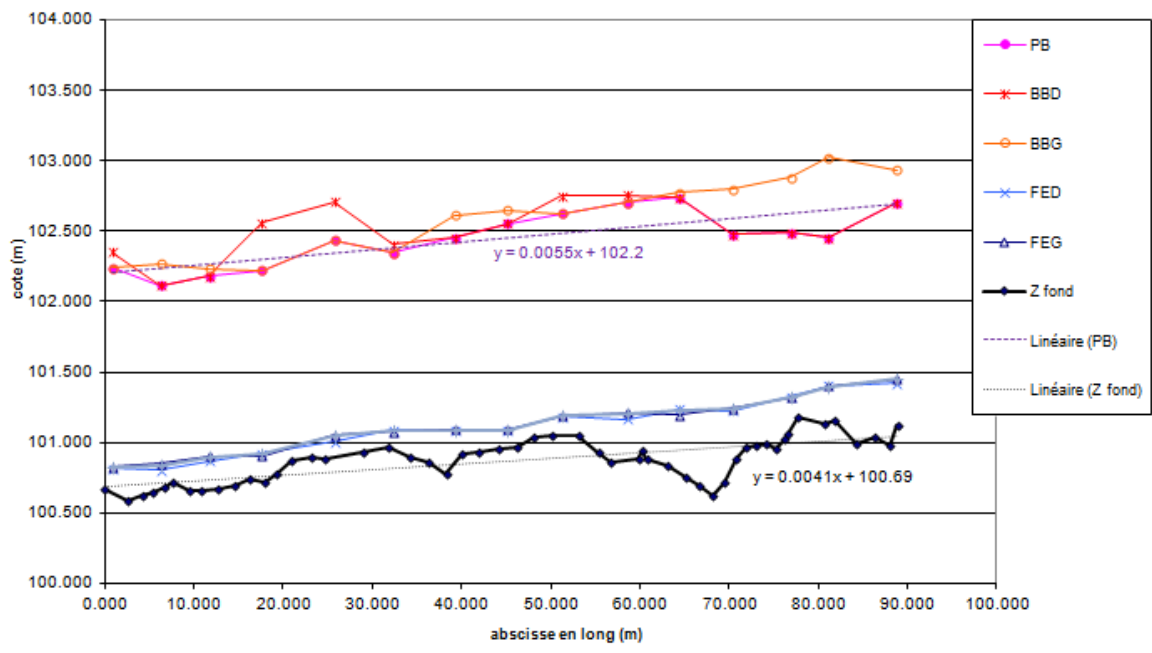
Q : 4 m³/s

Largeur au miroir : 6.1 m

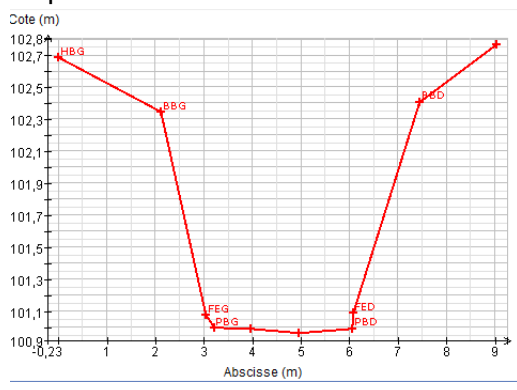
Hauteur d'eau moyenne : 1.0 m

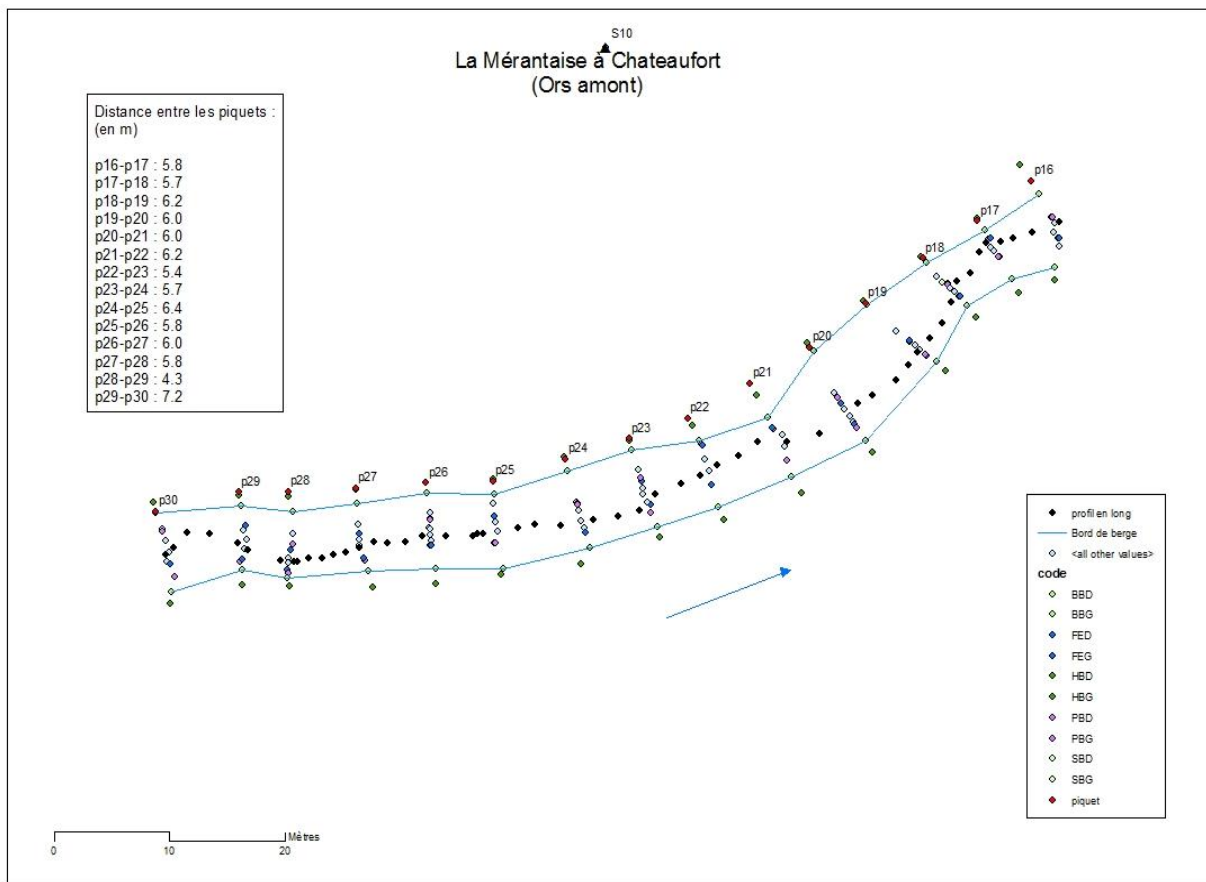
Profil en long et morphologie de la station :

Observé le 17/11/2011 à Q = 0.053 m³/s



Le profil en travers numéro 19 :





Département : 78

Coord (Lamb II ét.): 582825.239-2414410.801

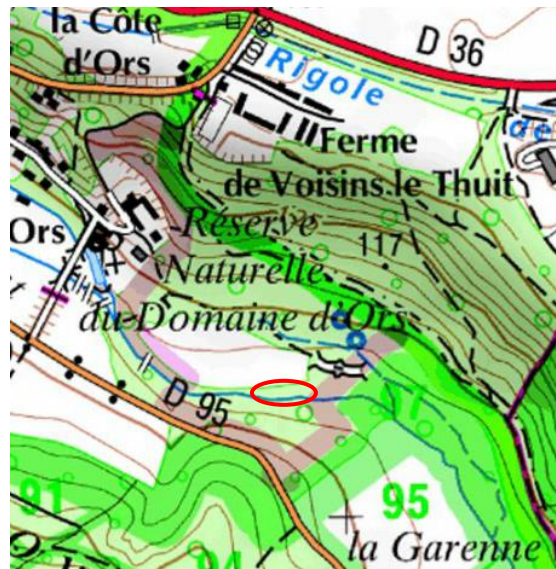
Taille BV: 23.1 km²

Pente fond : 0.43 %

Distance entre transects : 5 m

D₅₀ : 0.93 mm

Station hydro : sonde Diver installée sur le pont des Prés Bicheret



Caractéristiques à plein bord :

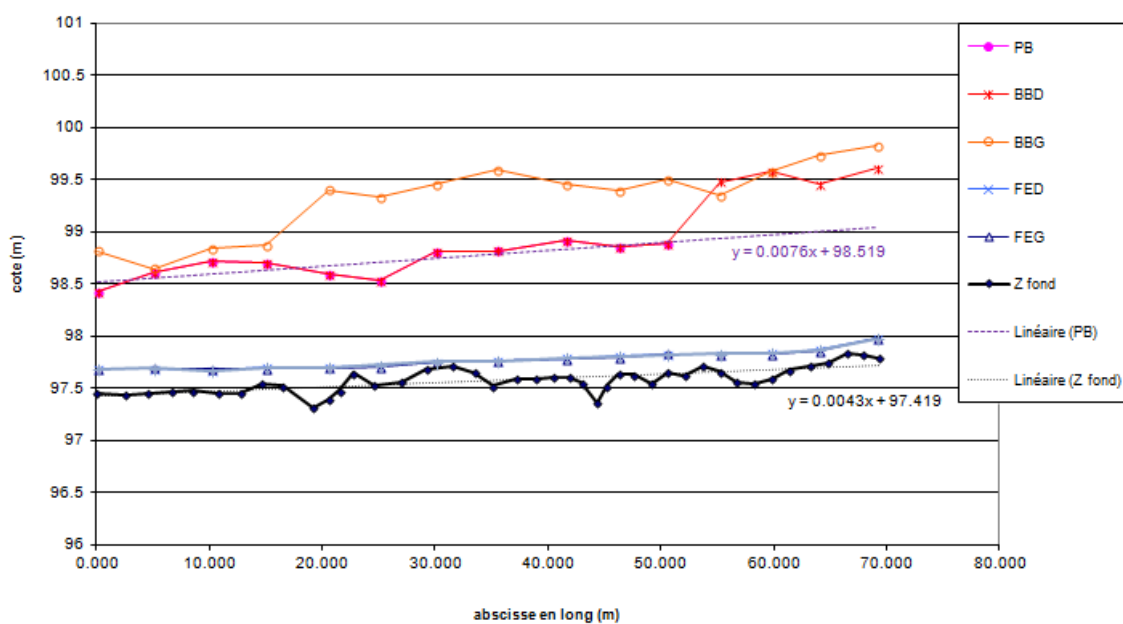
Q : 3.5 m³/s

Largeur au miroir: 6.0 m

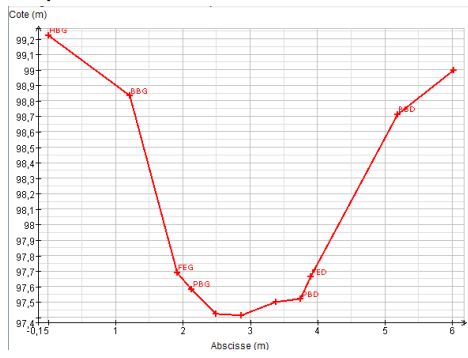
Hauteur d'eau moyenne : 0.9 m

Profil en long et morphologie de la station :

Observé le 15/11/2011 à Q = 0.061 m³/s



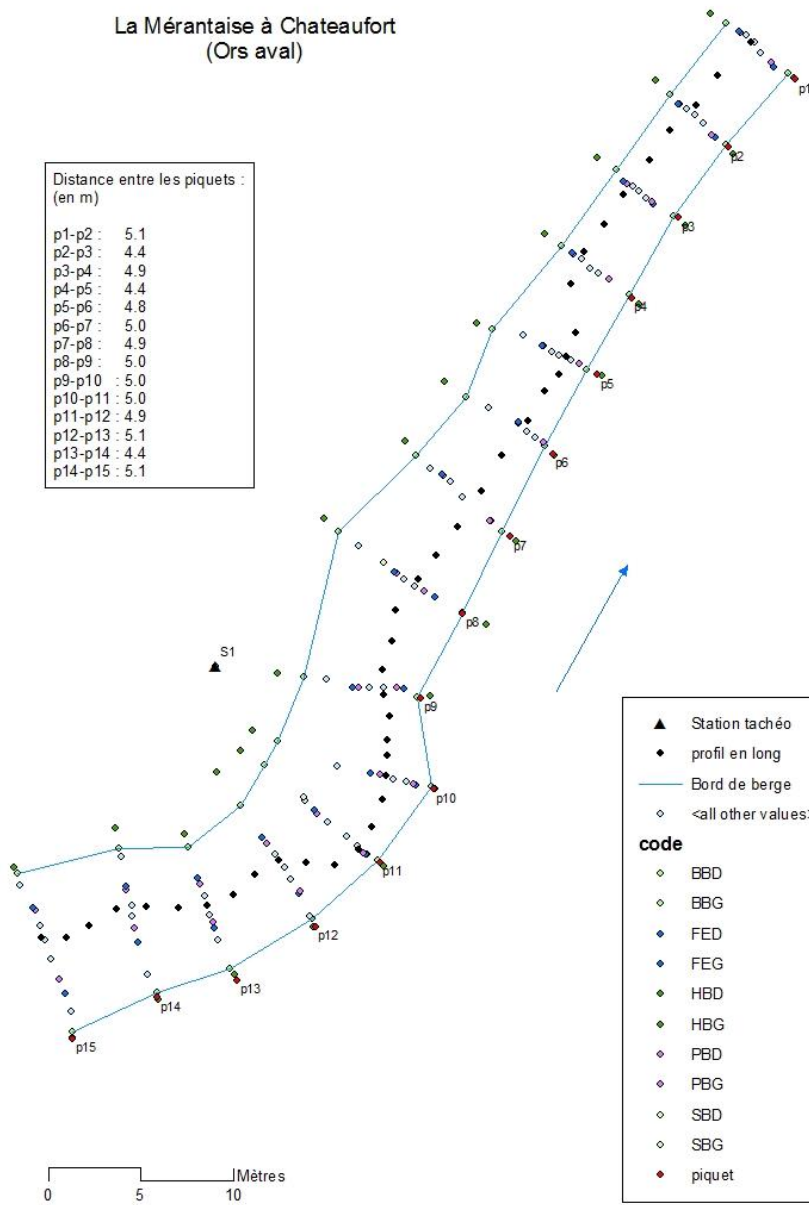
Le profil en travers numéro 3 :



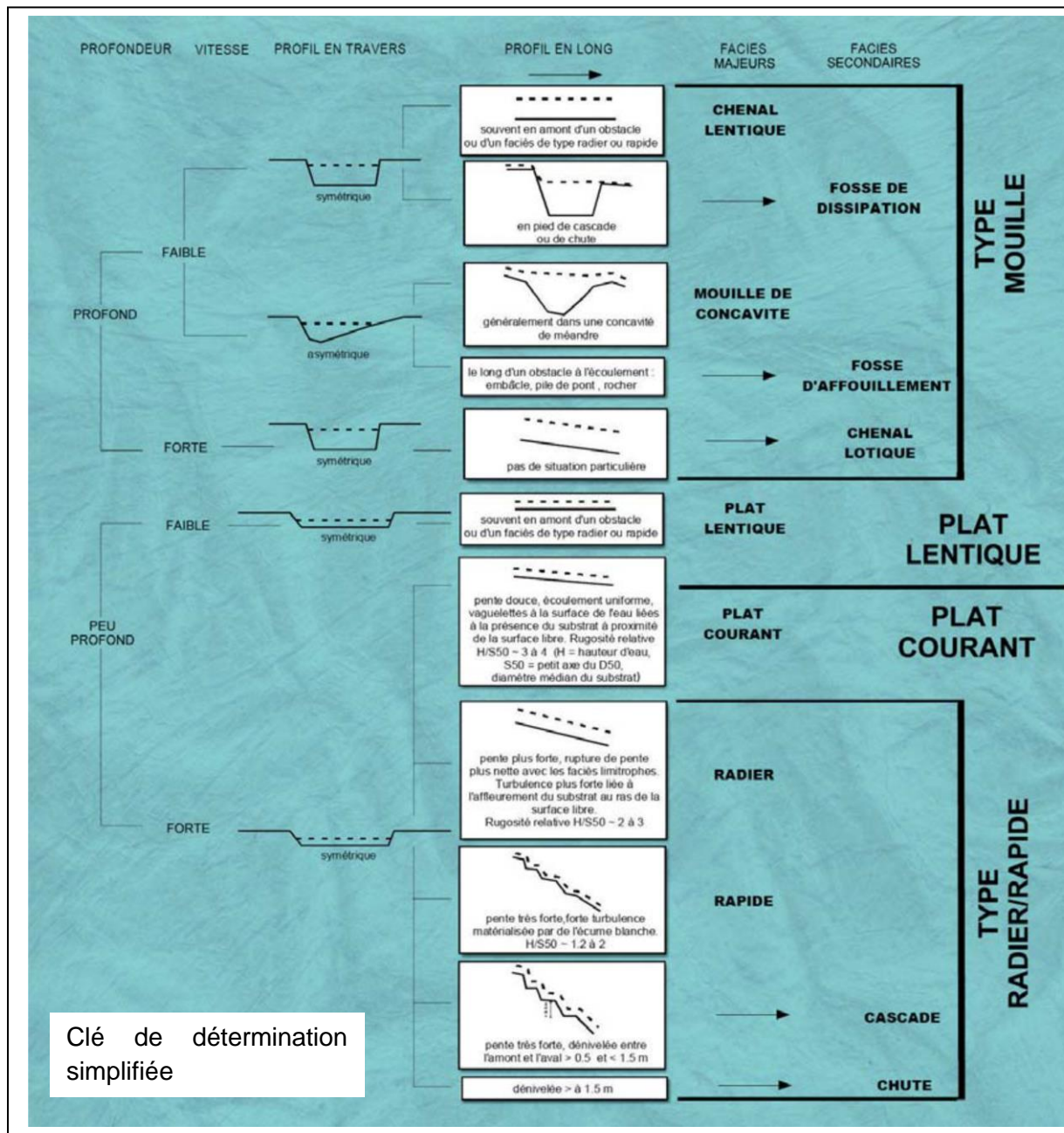
La Mérantaise à Chateaufort
(Ors aval)

Distance entre les piquets :
(en m)

p1-p2 :	5.1
p2-p3 :	4.4
p3-p4 :	4.9
p4-p5 :	4.4
p5-p6 :	4.8
p6-p7 :	5.0
p7-p8 :	4.9
p8-p9 :	5.0
p9-p10 :	5.0
p10-p11 :	5.0
p11-p12 :	4.9
p12-p13 :	5.1
p13-p14 :	4.4
p14-p15 :	5.1



Annexe 3 : Typologie utilisée lors de l'inventaire des faciès par le Parc Naturel Régional (faciès majeurs ET faciès secondaires identifiés).



Clé de détermination simplifiée

Annexe 4: Liste faunistique du contenu des prélèvements invertébrés 2011.

Ors amont	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	>2	>0
Beraeidae 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glossosomatidae 7	1	4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	7
Goeridae 7	4	4	3	1	1	0	0	6	0	7	0	0	5	26
Hydropsychidae 3	1	12	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	17
Hydroptilidae 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptoceridae 4	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	1	9
Limnephilidae	0	0	1	1	0	0	1	0	0	3	0	0	1	6
Psychomyidae 4	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baetidae 2	79	169	31	4	0	51	367	101	3	86	2	0	9	893
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Velidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrophilidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydraenidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elmis	13	40	15	1	0	0	4	2	0	9	3	0	6	87
Halplidae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthomyidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ceratopogonidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chironomidae	21	54	15	42	93	62	223	17	7	8	23	19	12	584
Dolichopodidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Empididae	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3
Limoniidae	0	8	3	3	4	0	0	3	1	1	2	0	5	25
Psychodidae	2	1	1	0	0	0	26	2	0	0	1	8	2	41
Simuliidae	11	15	1	0	1	315	154	0	4	0	1	0	5	502
Tipulidae	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	1	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asellidae	1	3	3	0	1	0	13	1	0	3	0	5	5	30
Gammaridae	112	34	87	65	3	4	191	165	9	30	47	70	12	817
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydracariens	3	22	4	22	5	17	30	2	0	5	4	0	9	114
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sphaeriidae	12	28	20	3	2	0	0	4	29	0	6	0	7	104
Acroloxidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ancylidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hydrobiidae	14	15	29	62	41	0	1	73	19	14	0	0	8	268
Lymnaeidae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Planorbidae	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
Valvatidae	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erpobdellidae	0	2	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	6
Glossiphoniidae	1	3	2	0	0	0	0	3	0	0	2	0	2	11
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oligochètes	11	99	33	14	10	0	1	48	14	0	1	22	8	253
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dendrocoelidae	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
Dugesidae	2	17	2	0	0	1	5	2	0	0	1	0	2	30
Planariidae	10	2	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	1	16
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Némathelminthes	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrozoaires	0	1	5	0	0	0	5	0	0	0	3	0	3	14

	Ors aval													>2	>0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Beraeidae 7	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Glossosomatidae 7	0	0	5	0	0	0	10	0	2	0	38	2	3	57	
Goeridae 7	0	0	1	0	1	0	0	10	0	0	2	1	1	15	
Hydropsychidae 3	6	15	32	32	0	0	2	0	6	9	11	3	8	116	
Hydroptilidae 5	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
Leptoceridae 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Limnephilidae	1	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	12	
Psychomyidae 4	1	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Baetidae 2	17	34	63	40	0	0	28	7	71	92	62	27	10	441	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Velidae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hydrophilidae	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Hydraenidae	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Elmis	76	156	173	52	0	0	10	38	55	32	122	19	10	733	
Haliplidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Anthomyidae	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Ceratopogonidae	0	38	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	41	
Chironomidae	498	1151	292	501	23	98	15	8	26	9	58	19	12	2698	
Dolichopodidae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Empididae	2	3	5	3	1	0	0	0	1	0	1	0	3	16	
Limoniidae	0	38	6	3	1	18	8	6	2	5	9	4	9	100	
Psychodidae	13	57	9	1	0	3	1	0	1	0	1	1	4	87	
Simuliidae	2	61	3	193	0	0	1	0	1	4	3	4	6	272	
Tipulidae	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Asellidae	6	13	3	0	0	0	0	1	1	0	1	1	3	26	
Gammaridae	151	1618	224	46	13	46	134	46	87	98	153	39	12	2655	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hydracariens	61	55	103	91	3	1	2	13	20	6	31	6	10	392	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sphaeriidae	0	150	62	9	2	139	4	10	20	0	36	10	9	442	
Acroloxidae	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Ancylidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
hydrobiidae	0	28	0	0	22	11	4	10	15	2	35	7	8	134	
Lymnaeidae	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	5	
Planorbidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Valvatidae	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Erpobdellidae	0	10	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	14	
Glossiphoniidae	1	30	1	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1	36	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Oligochètes	15	129	7	52	2	48	20	20	19	17	19	7	11	355	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Dendrocoelidae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	
Dugesidae	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Planariidae	3	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Némathelminthes	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Hydrozoaires	33	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	38	

Béchéreau amont	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	>2	>0
Beraeidae 7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Hydroptilidae 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydropsychidae 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agapetinae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptoceridae 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mystacides	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Limnephilidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Psychomyidae 4	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9
Rhyacophilidae 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baetidae 2	0	4	25	1	6	3	10	1	0	0	0	1	5	51
Ephemeroidea 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Ephemerellidae 3	0	0	2	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	6
Velidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrophilidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dryopidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elmidae	0	5	2	5	1	0	1	0	0	0	1	1	2	16
Hydraenidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Scirtidae Helodidae	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthomyidae	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4
Ceratopogonidae	10	2	0	0	0	1	8	8	1	2	0	2	3	34
Chironomidae	199	942	378	177	151	40	103	282	331	63	21	97	12	2784
Dixidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dolichopidae	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Empididae	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Limoniidae	2	6	0	0	11	4	3	0	0	7	34	4	7	71
Psychodidae	13	22	7	79	5	9	3	1	0	3	3	3	10	148
Pychopteridae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rhagionidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Syrphidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Simuliidae	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7
Tabanidae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Tipulidae	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4
ND	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calopterygidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cordulegasteridae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sialidae	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asellidae	0	6	1	2	2	0	1	0	0	0	0	0	1	12
Gammaridae	0	36	2	13	12	1	2	0	0	0	1	0	3	67
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecrevisse ?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydracariens	6	3	3	0	0	2	0	2	21	0	1	0	4	38
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sphaeriidae	114	14	0	0	0	30	97	42	244	134	90	457	9	1222
Ancylidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acroloxidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrobiidae	54	26	2	5	1	8	21	7	41	21	23	105	10	314
Lymnaeidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glossiphoniidae	1	3	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	2	8
Erpobdellidae	0	2	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	6
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oligochètes	685	190	7	36	57	134	1128	1360	1935	133	97	352	12	6114
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dugesidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Planariidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nemathelminthes	2	2	0	0	1	2	2	4	0	0	0	0	1	13
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrozoaires	0	9	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	12
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Béchereau aval	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	>2	>0
Beraeidae 7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Hydroptilidae 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Hydropsychidae 3	0	1	0	0	13	5	0	0	1	16	0	0	3	36
Agapetinae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Leptoceridae 4	0	0	4	0	8	11	1	0	16	1	0	0	4	41
Mystacides	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Limnephilidae	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4
Psychomyidae 4	9	10	4	11	4	2	0	0	0	0	0	0	5	40
Rhyacophilidae 4	0	1	0	0	24	4	0	0	3	21	0	0	4	53
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baetidae 2	0	36	65	8	289	159	1	0	133	190	0	0	7	881
Ephemeridae 6	3	0	1	0	0	9	2	0	3	1	1	1	3	21
Ephemerellidae 3	3	11	14	1	21	24	0	0	30	17	2	0	7	123
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Velidae	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrophilidae	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
Dryopidae	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Elmidae	12	28	19	0	193	83	0	3	36	121	1	1	8	497
Hydraenidae	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Scirtidae Helodidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Anthomyidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ceratopogonidae	0	1	13	0	1	2	0	26	0	0	5	31	4	79
Chironomidae	82	3899	2399	63	136	291	240	945	492	647	77	882	12	10153
Dixidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Dolichopidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Empididae	0	5	2	2	2	10	1	1	4	2	0	0	3	29
Limoniidae	0	3	3	2	21	6	0	7	9	4	1	0	7	56
Psychodidae	3	20	23	0	0	2	0	14	3	0	0	4	6	69
Pychopteridae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Rhagionidae	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
Syrphidae	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
Simuliidae	0	6	0	0	32	7	0	0	20	36	2	0	5	103
Tabanidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipulidae	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6
ND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Calopterygidae	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7
Cordulegasteridae	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sialidae	1	2	9	0	1	0	1	11	2	1	2	0	2	30
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Asellidae	8	20	17	0	0	1	0	0	3	0	0	0	4	49
Gammaridae	42	121	340	0	97	118	6	10	161	51	1	0	9	947
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecrevisse ?	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydracariens	0	25	7	0	6	13	0	0	14	9	0	6	7	80
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sphaeriidae	0	5	27	0	13	15	40	9	34	8	1	207	9	359
Ancylidae	0	2	0	0	16	16	0	2	15	30	1	0	4	82
Acroloxidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Hydrobiidae	3	176	255	2	26	131	21	20	123	30	4	25	11	816
Lymnaeidae	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glossiphoniidae	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3
Erpobdellidae	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oligochètes	7	606	440	4	32	49	42	333	29	8	29	895	12	2474
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dugesidae	0	0	4	0	4	0	0	0	0	1	0	0	2	9
Planariidae	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nemathelminthes	0	4	5	0	2	1	0	2	3	1	1	1	3	20
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydrozoaires	0	29	15	0	6	4	0	0	3	0	0	0	5	57
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe 4 : Probabilité d'appartenance de chaque truite aux 3 lignées génétiques détectées :
Mérantaise, Aulne et Pisciculture.

ID truite	Cours d'eau d'origine	Mérantaise	Aulne	Pisciculture
1	MER	0,989	0,005	0,006
2	MER	0,877	0,007	0,117
3	MER	0,99	0,004	0,006
4	MER	0,995	0,002	0,003
5	MER	0,995	0,002	0,003
6	MER	0,99	0,005	0,005
7	MER	0,995	0,002	0,003
8	MER	0,994	0,003	0,003
9	MER	0,974	0,004	0,023
10	MER	0,995	0,002	0,003
11	MER	0,739	0,003	0,258
12	AUL	0,002	0,994	0,004
13	AUL	0,002	0,991	0,007
14	AUL	0,002	0,994	0,004
15	AUL	0,002	0,996	0,003
16	AUL	0,002	0,991	0,007
17	AUL	0,021	0,737	0,242
18	AUL	0,003	0,983	0,014
19	MER	0,995	0,002	0,002
20	MER	0,992	0,003	0,005
21	MER	0,99	0,003	0,007
22	MER	0,863	0,047	0,089
23	MER	0,993	0,002	0,005
24	MER	0,991	0,002	0,006
25	MER	0,995	0,002	0,003
26	MER	0,995	0,002	0,003
27	MER	0,994	0,002	0,004
28	MER	0,996	0,002	0,002
29	MER	0,996	0,002	0,003
30	MER	0,994	0,003	0,004
31	AUL	0,004	0,992	0,005
32	AUL	0,008	0,987	0,005
33	AUL	0,002	0,994	0,004
34	AUL	0,006	0,989	0,005
35	AUL	0,004	0,972	0,024
36	AUL	0,003	0,991	0,006
37	AUL	0,002	0,99	0,007
38	AUL	0,003	0,989	0,008
39	AUL	0,003	0,99	0,007
40	pisciculture	0,021	0,002	0,977
41	pisciculture	0,004	0,033	0,963
42	pisciculture	0,003	0,119	0,878
43	pisciculture	0,003	0,018	0,978

44	pisciculture	0,003	0,019	0,979
45	pisciculture	0,035	0,003	0,961

En caractère rouge, les marques d'introgression avec des truites domestiques.

Annexe 5 : Bilan des individus marqués pour le suivi télémétrique des déplacements.

ID truite	Poids (gr)	Taille (mm)	Cours d'eau	Poids émetteur (gr)	Durée du suivi (jour)	Durée théorique des émetteurs	Remarques	nbr de localisation manuelle	nbr de localisation des boitiers	boitier ayant enregistré
1	70	178	MER	1,7	106	58	fin de vie émetteur	18	0	0
2	78	194	MER	1,7	0	58	morte le lendemain du marquage émetteur	0	0	0
3	204	268	MER	4	296	441	retrouvé sur la berge après la période de frai	41	266	P2P
4	104	212	MER	2,5	0	158	morte le lendemain du marquage	0	0	0
5	196	261	MER	2,5	0	158	morte le lendemain du marquage émetteur	0	0	0
6	656	424	MER	4	322	441	entendu au pied d'un arbre après la période de frai	47	3563	P2P
7	154	235	MER	2,5	174	158	fin de vie émetteur	28	320	P2P
8	80	196	MER	1,7	7	58	entendu au pied d'un arbre	1	0	0
9	300	329	MER	4	0	441	morte le lendemain du marquage	0	0	0
10	174	247	MER	2,5	63	158	perdue en cours (15/05)	10	166	P2P
11	1246	498	MER	4	77	441	perdue en cours (29/05)	10	9	P2P
12	406	329	AUL	4	367+	441	fin du suivi	51	5210	GAL
13	112	221	AUL	1,7	0	58	non retrouvée suite au marquage	0	0	0
14	418	342	AUL	4	367+	441	fin du suivi	50	0	0
15	702	400	AUL	4	367+	441	fin du suivi	51	31	BUL
16	506	350	AUL	4	367+	441	fin du suivi	51	701	GAL
17	1022	446	AUL	4	367+	441	fin du suivi	48	50960	GAL
18	730	411	AUL	2,5	249	158	fin de vie émetteur	34	556	GAL+BECH
19	204	247	MER	4	4	441	non retrouvée suite au	0	5	P2P+ORS

20	94	200	MER	1,7	105	58	marquage (localisée à Ors puis disparition)	15	0	0
21			MER	1,7		58	fin de vie émetteur non retrouvée	0	0	0
22	90	192			0		suite au marquage	0	0	0
23	482	380	MER	4	349+	441	fin du suivi	48	5	P2P
24	322	321	MER	4	349+	441	fin du suivi	47	49	P2P
25	246	293	MER	2,5	78	158	perdue en cours (20/06)	12	10	P2P
26			MER	2,5		158	non retrouvée	0	0	0
27	130	224			0		suite au marquage	0	0	0
28	560	391	MER	4	275	441	non retrouvée pendant ou après la période de frai	38	4	P2P
29			MER	1,7		58	non retrouvée	14	0	0
30	110	201			0		suite au marquage	14	0	0
31	246	294	MER	2,5	37	158	perdue en cours (10/05)	5	15	P2P
32	1562	506	MER	2,5	147	158	fin de vie émetteur	22	79270	ORS
33	138	226	MER	2,5	14	158	perdue en cours (17/04)	3	0	0
34	82	200	AUL	1,7	83	58	fin de vie émetteur	10	0	0
35	84	195	AUL	1,7	95	58	fin de vie émetteur	14	0	0
36	578	383	AUL	4	347+	441	fin du suivi	48	0	0
37	98	190	AUL	1,7	116	58	fin de vie émetteur	17	0	0
38	740	421	AUL	2,5	138	158	fin de vie émetteur	20	0	0
39	1724	554	AUL	4	347+	441	fin du suivi	48	0	0
40	552	376	AUL	2,5	131	158	fin de vie émetteur	19	0	0
41	262	287	AUL	2,5	145	158	fin de vie émetteur	21	0	0
42	936	444	AUL	2,5	138	158	fin de vie émetteur	20	17409	BECH

* à la fin du suivi, l'émetteur continuait d'émettre.

- Kemp, P.S. & O'Hanley, J.R. 2010. Procedures for evaluating and prioritising the removal of fish passage barriers: a synthesis. *Fisheries Management and Ecology* 17: 297-322.
- Knaapen, J.P., Scheffer, M. & Harms, B. 1992. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning* 23: 1-16.
- le Pichon, C., Gorges, G., Baudry, J., Boussard, H., Goreaud, F., Faure, T. & Boët, P. 2007. Méthodes et outils d'analyse spatiale des habitats des poissons en contexte fluvial anthropisé (Methods and tools for the spatial analysis of fish habitats in human impacted rivers) *Ingénieries - E A T* 50: 21-33.
- Le Pichon, C., Gorges, G., Faure, T. & Boussard, H. 2006. Anaqualand 2.0 : freeware of distances calculations with frictions on a corridor. Antony: Cemagref, pp. <https://www6.rennes.inra.fr/sad/Outils-Produits/Outils-informatiques/Anaqualand>.
- Le Pichon, C., Talès, E., Clément, F., Leclerc, N., Gorges, G. & Zahm, A. 2013. Effet des discontinuités physiques sur la distribution spatiale des poissons en tête de bassin : cas de l'Orgeval. *L'observation long terme en environnement: Exemple du bassin versant de l'Orgeval*. Versailles: Editions QUAE.
- Ovidio, M. 1999. Annual activity cycle of adult brown trout (*Salmo trutta* L.): A radio-telemetry study in a small stream of the Belgian Ardenne. *Bulletin Francais De La Peche Et De La Pisciculture*: 1-18.
- Ovidio, M., Baras, E., Goffaux, D., Giroux, F. & Philippart, J.C. 2002. Seasonal variations of activity pattern of brown trout (*Salmo trutta*) in a small stream, as determined by radio-telemetry. *Hydrobiologia* 470: 195-202.
- Civade, R., Dejean, T., Roset, N., Raymond, J.C., Bonin, A., Taberlet, P., Pont, D. (2016). Spatial representativeness of environmental DNA metabarcoding signal for fish biodiversity assessment in a natural freshwater system. *PLoS One*, 11(6): e0157366.
- Ficetola, G.F., Pansu, J., Bonin, A., Coissac, E., Guiguet-Covex, C., De Barba, M., Gielly, L., Lopes C.M., Boyer F., Pompanon F., Rayé G., Taberlet P.(2015). Replication levels, false presences and the estimation of the presence/absence from eDNA metabarcoding data. *Mol. Ecol. Resour.* 15, 543–556.
- Jane, S.F., Wilcox, T.M., McKelvey, K.S., Young, M.K., Schwartz, M.K., Lowe, W.H., Letcher, B.H., Whiteley, A.R. (2014). Distance, flow and PCR inhibition: eDNA dynamics in two headwater streams. *Molecular ecology resources*, 15(1), 216-227.
- Laramie, M. B., Pilliod, D. S., & Goldberg, C. S. (2015). Characterizing the distribution of an endangered salmonid using environmental DNA analysis. *Biological Conservation*, 183, 29-37.
- Shogren A.J., Tank J.L., Andruszkiewicz E., Olds B., Mahon A.R., Jerde C.J., Bolster D. (2017). Controls on eDNA movement instreams: Transport, Retention, and Resuspension. *Scientific Reports*, 7(1), 5065.
- Wilcox T.M., McKelvey K. S., Young M.K. , Sepulveda A. J. , Shepard B. B., Jane S. F., Whiteley A.R., Lowe W.H. , Schwartz M. K. (2016). Understanding environmental DNA detection probabilities: A case study using a stream-dwelling char *Salvelinus fontinalis*. *Biological Conservation* 194, 209–216