
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Impact des aménagements hydroélectriques
sur le recrutement en truite fario de la Cère en
aval du barrage de Brugale entre 2012 et 2023



352 Av. Roger Tissandié, 31600 Muret

Tuteur entreprise : Laurent Cazeneuve
Ingénieur hydrobiologiste

Arthur
ROUGEYRES
IMA

Tuteur académique : Catherine Boisneau

2023-2024

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe ECOGEA qui m'a accueilli et dont chacun d'entre eux m'a fait découvrir ses activités. Vous m'avez permis de vous accompagner sur tout un panel de missions de terrain, toutes aussi intéressantes les unes que les autres, et j'ai ainsi pu découvrir de nombreuses facettes des métiers autour des milieux aquatiques. Je retiendrais vos partages d'expériences, vos conseils pour la suite et votre bonne humeur. Mention spéciale à Jean Kardacz, sa grande gentillesse et ses précieux savoirs et expériences de vieux briscard.

Je remercie tout particulièrement Laurent Cazeneuve, mon maître de stage et partenaire de course, pour son accompagnement sans faille tout au long de ma mission et ses précieux conseils de pêcheur aguerri et passionné. De même, merci à Jean-Marc Lascaux pour avoir supervisé ce stage et m'avoir encadré avec Laurent. Vous avez été d'une grande aide.

Enfin, je tiens à remercier Théo Bulteau sans qui ce stage n'aurait pas eu lieu, comme quoi les choses ne tiennent parfois pas à grand-chose (un blanc en cours suivi d'une question a priori anodine : « Au fait, vous savez où vous voulez faire votre stage ?? »).

1. Introduction

Ayant fait un stage avec un technicien de rivière lors de ma troisième année d'école d'ingénieur dans le domaine de la restauration des milieux aquatiques, j'ai voulu expérimenter mon second domaine de cœur concernant les rivières, l'hydrobiologie. Passionné par la pêche de la truite et les cours d'eau salmonicoles, j'avais à cœur que mon sujet de stage se rapporte de près ou de loin à ce type de milieux.

Aucune autre structure n'était mieux adaptée qu'ECOGEA, bureau d'étude fort d'une longue expérience en hydrobiologie, reconnu dans le domaine et travaillant essentiellement sur les bassins pyrénéens et du massif central, soit sur des cours d'eau salmonicoles.

Le premier sujet qui m'a été proposé m'a d'emblée pleinement convaincu et motivé. Il s'agissait de **l'étude de l'impact des aménagements hydroélectriques sur le recrutement des poissons en aval du barrage de Brugale sur la Cère** dans le département du Lot. C'est finalement sur **la truite fario** que l'étude s'est portée, le cortège piscicole étant varié sur cette rivière et donc les sensibilités et réactions aux différents facteurs abiotiques différentes.

Pour toute question ou détail, notamment d'ordre technique ou théorique, se référer au livrable de l'étude Cère (**annexe 7.2**) dans lequel se trouve toutes les définitions, entre autres.

2. Présentation sommaire de la structure

ECOGEA est un bureau d'études en environnement spécialisé sur les milieux aquatiques. Créé en 1997 par Jean-Marc Lascaux, il fut renforcé en 2001 par l'arrivée du biologiste Thierry Lagarrigue, puis par Bruno Voegtli dans le but d'évoluer vers « l'écohydraulique ». Cela a permis d'investir et de développer un nouveau secteur d'activité, les études d'hydraulique fluviale et de conception d'aménagements de franchissement piscicole. C'est enfin en avril 2014 qu'ECOGEA s'est renforcé avec la venue, en tant que quatrième associé, de Philippe Baran, ancien directeur du pôle Ecohydraulique de l'ONEMA. ECOGEA réunit aujourd'hui les compétences de onze personnes et assure des missions d'études et de conseils ainsi que des activités de maîtrise d'œuvre (Figure 1) :

- Études hydrobiologiques de cours d'eau et de plan d'eau (études in situ, synthèses bibliographiques)
- Études d'habitat concernant des espèces cibles (truite commune, saumon atlantique, grande alose, alose feinte, lamproie marine, écrevisses autochtones)
- Études d'impacts d'aménagements sur les milieux aquatiques (hydroélectricité, infrastructures routières, etc.)
- Études d'incidences hydrauliques et hydrobiologiques dues aux aménagements en cours d'eau (construction ou démolition d'ouvrages)
- Études de conception, de suivi et de contrôle de l'efficacité de dispositifs de franchissement piscicole
- Détermination de débits réservés et de débits minimum biologiques (DMB)
- Conseil en gestion, en aménagement et en restauration des milieux aquatiques
- Formation et l'initiation à la vie des lacs et des cours d'eau, la création d'outils pédagogiques

Mon stage a été encadré par Laurent Cazeneuve, ingénieur d'études et Jean-Marc Lascaux, docteur en hydrobiologie et gérant du bureau d'études. Ils étudient les impacts des aménagements hydroélectriques sur la biocénose aquatique et en particulier l'ichtyofaune. Ils réalisent des diagnostics écologiques et piscicoles sur la base d'échantillonnages piscicoles ou de suivis de reproduction d'espèces-cibles. Ils sont notamment spécialistes de la problématique « éclusées » par le biais de nombreux travaux sur la Dordogne et ses affluents (Maronne, Cère, Vézère), la Creuse ou encore le Lot, études réalisées pour des maîtres d'ouvrage tels que EDF, des établissements publics territoriaux de bassin (EPIDOR), des syndicats mixtes (SMB Lot) ou encore les Agences de l'eau (AEAG). Ils réalisent également des études de débit minimum biologique (DMB) et volumes prélevables dans le cadre de création de nouvelles prises d'eau ou de renouvellements d'autorisation de centrales hydroélectriques, que ce soit pour EDF ou des producteurs autonomes. Enfin, ils ont noué des partenariats techniques avec des fédérations de pêche et protection du milieu aquatique (09, 65) dans le cadre de suivis long terme du peuplement piscicole pour le compte de la division R&D d'EDF.

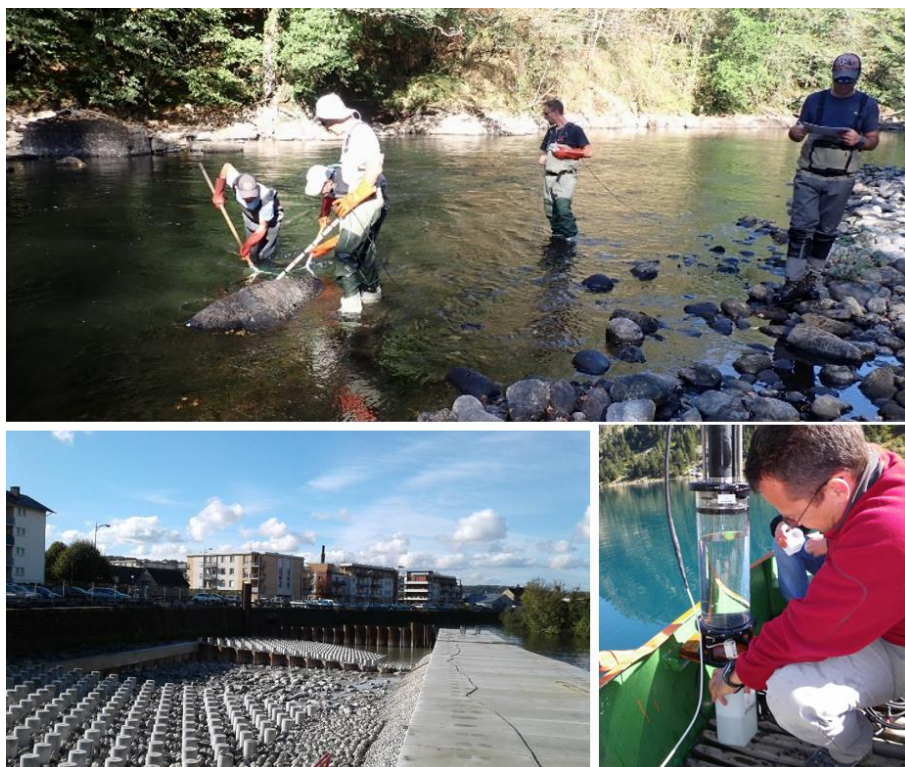


Figure 1 : Pêche électrique sur la Cère à Mespoulet-bas – aménagement d’une passe à poissons sur la Risle – suivi de qualité d’eau sur le lac de Gaube (ECOGEA)

3. Missions et problématiques abordées

J'ai eu la chance de participer à diverses missions en accompagnant quasiment chaque membre de l'entreprise, bien que ma mission principale, celle à laquelle j'ai consacré le plus de temps, fut la rédaction de l'étude sur l'impact des aménagements hydroélectriques sur le recrutement en truites sur la Cère en aval du barrage de Brugale (Figure 2). Cette mission de suivi biologique s'inscrit dans un contexte de veille écologique menée par ECOGEA pour le compte d'EPIDOR (établissement public territorial du bassin de la Dordogne). Cette veille consiste à suivre :

- le peuplement piscicole sur le bassin de la Dordogne corrézienne (en aval du barrage du sablier) et lotoise ainsi que sur les affluents principaux (Maronne, Cère, Vézère) via des pêches d'échantillonnage piscicole réalisées chaque été,
- la reproduction des différentes espèces de poisson présentes (grands salmonidés notamment),
- l'impact des éclusées (fluctuations artificielles du débit dans les cours d'eau provoquées par le démarrage et l'arrêt du turbinage par les centrales hydroélectriques) par le suivi du piégeage-échouage des poissons à la suite des baisses d'éclusées (arrêt des turbines occasionnant une baisse, parfois importante, du niveau d'eau).

En l'occurrence sur la Cère en aval de Brugale (14 km de linéaire entre le barrage et la confluence avec la Dordogne), trois stations de pêche électrique sont suivies annuellement : la station 1 « Mespoulet-bas » située à 900 m en aval du barrage, celle sur laquelle j'ai fait l'étude puisque la seule en zone à truite, puis deux autres stations situées à 6 et 11 km du barrage.

A partir d'un jeu de données de débit, de température d'eau et d'abondance piscicole, **l'objectif de l'étude était de caractériser l'effet des aménagements hydroélectriques du bassin de la Cère sur le recrutement** (i.e. la production en juvéniles) **en truites**, et particulièrement d'analyser **l'effet des éclusées générées par l'usine de Brugale pour in fine proposer des mesures de mitigation**.



Figure 2 : Barrage-usine de Brugale sur la Cère aval (A. Rougeyres)

En parallèle de ce travail, j'ai pu participer à diverses missions de terrain :

Dans le cadre de la veille écologique menée sur le bassin de la Dordogne :

- Suivi du piégeage-échouage des poissons ainsi que de l'exondation des nids de frai des poissons lithophiles (i.e. se reproduisant sur un substrat minéral) à la suite des baisses d'éclues, sur la Cère et la Maronne. Cela a consisté en la prospection avec le technicien de terrain Jean Kardacz des zones propices à l'exondation des nids et au piégeage-échouage des poissons suite au retrait de l'eau (dépressions, cuvettes, chenaux secondaires, etc.), à l'identification, au dénombrement des poissons et nids exondés et la description de l'état des individus (mort ou vif, stade œuf, alevin, juvénile ou adulte). Nous avons par la suite estimé la quantité de poissons piégés-échoués, rapportée à la surface/linéaire prospecté, ainsi que le risque d'exondation des nids sensibles en vue de baisses plus intenses.
- Suivi de la reproduction des lamproies marines sur la Cère et la Maronne : j'ai prospecté les linéaires dont la granulométrie se prêtait à l'édification des nids de lamproie pour les dénombrer, mesurer leurs caractéristiques (profondeur du dôme et du creux, longueur-largeur du nid dans son ensemble) puis estimer leur risque d'exondation en fonction de leur position dans le chenal.
- Suivi de la reproduction du brochet par pêche électrique dans les couasnes de la Dordogne lotoise et périgourdine. En l'occurrence, j'étais soit à l'épuisettage, soit à la prise de notes (espèces recensées, nombre, taille et description de l'habitat au droit du point de capture).

Dans le cadre d'études d'impacts, DMB ou DFC (Dossier de Fin de Concession hydroélectrique) :

- Relevés topographiques et de lignes d'eau à la station totale et courantométrie sur le Gave d'Oron – l'Adour de Gripp et de Payolle – l'Ouzom ; tout cela en vue du calage de modèles hydrauliques. J'ai donc utilisé la station totale d'ECOGEA avec mon binôme qui lui se déplaçait avec la mire pour décrire la configuration du lit et l'altitude des lignes d'eau tandis que de mon côté, je visais la mire avec la station pour enregistrer les points du futur nuage de points.
- Pose et relève de thermographes en lacs et rivières et mesures physico-chimiques (lac de Labarre sur l'Ariège, le Lot en aval du barrage de Castelnau-Lassouts). Sur le lac de Labarre, nous avons fabriqué un système pour mesurer la température en trois points (fond, 2 m et 50 cm en dessous de la surface) au niveau du point le plus profond du lac. Ce système, constitué d'un poids de 40 kg, d'une corde sur laquelle sont fixés les trois thermographes et une bouée, a été disposé à l'aide d'un bateau équipé d'un échosondeur.

Dans le cadre de contrôles pour les services de l'Etat (DDT) et l'Office Français pour la biodiversité :

- Suivi des lésions – mortalités sur les truites à la dévalaison d'un pisciduc sur le Gave d'Ossau (Usine de St-Cricq). Cette manipulation consistait en la fabrique et mise en place d'un dispositif de collecte des poissons introduits dans l'entrée du pisciduc (truites arc-en-ciel de pisciculture, deux classes d'âge pour se rapprocher du gabarit d'un gros géniteur de saumon atlantique, puis des truites plus petites pour reproduire un smolt – jeune saumon rejoignant la mer. Le Gave d'Ossau présente un enjeu fort de continuité écologique vis-à-vis des migrants) pour évaluer l'état dans lequel sortent les poissons empruntant le pisciduc. Malheureusement après son installation, notre dispositif de collecte a été vandalisé ce qui a empêché de poursuivre la manipulation avec les truites. Nous avons seulement pu mesurer l'accélération, la vitesse et la pression dans le pisciduc à l'aide de capteurs introduits dans celui-ci, le but étant de ne plus avoir à introduire de poissons vivants à terme pour des raisons éthiques et de pouvoir arbitrer sur le caractère non-destructeur du pisciduc seulement à l'aide des paramètres physiques mesurés.

Dans le cadre de la gestion sédimentaire des retenues hydroélectriques pour le compte d'EDF :

- Suivi des MES (Matières En Suspension) durant la transparence menée sur la retenue d'Artigues sur l'Adour de Gripp. Cette manipulation s'est conduite en collaboration avec les techniciens EDF qui s'occupaient de régler le débit de vidange de la retenue en fonction de nos mesures de MES que nous faisions en parallèle. Le but était de ne pas dépasser les seuils réglementaires, à savoir 5 mg/L en instantané et 3 mg/L sur plus de 2h consécutives. Pour effectuer les mesures, mon collègue et moi se relayions à la sonde MES en aval de la retenue toutes les 30 min, et l'autre à la mesure manuelle des MES à l'aide d'un dispositif de verrerie qui permet de recueillir les sédiments sur un filtre que l'on vient sécher puis peser pour déterminer la concentration et attester du non dépassement des seuils.

En parallèle du rapport Cère, j'ai aussi rédigé des comptes rendus de sorties terrain (suivi du piégeage-échouage post éclusées) ainsi que le compte rendu annuel sur la reproduction du brochet dans les couasnes de la Dordogne suite aux échantillonnages réalisés début juillet.

J'ai donc en somme pu entrevoir tout un panel de domaines concernant les milieux aquatiques et leurs habitants en abordant les notions **d'impacts des aménagements hydroélectriques**, que ce soit sur le blocage du transit sédimentaire (transparence de la retenue d'Artigues), l'altération du régime hydrologique (éclusées au barrage de Brugale et leurs incidences biologiques) ou l'aspect continuité écologique (pisciduc sur le Gave d'Ossau) ; **d'hydrobiologie** avec la reproduction de deux espèces (une lithophile, la lamproie marine, et l'autre phytophile, le brochet) ; et de **suivi des cours d'eau** (mesures de la température d'eau et de la physico-chimie).



Figure 3 : Recherche de pontes de chevesne sur des renoncules aquatiques – géniteur de lamproie marine sectionné par une turbine – retenue d'Artigues sur l'Adour de Gripp pendant la transparence sédimentaire

4. Méthodologie et rôle que vous avez joué

4.1. Formations aux bases du sujet et collecte des données

Comme expliqué précédemment, ma mission principale fut l'étude de l'impact des aménagements hydroélectriques et des éclusées sur le recrutement en truites sur la Cère. J'ai donc dans un premier temps eu comme tâche de me former à la question des éclusées en me documentant auprès de divers supports sur le sujet dont un guide (« Guide technique du SDAGE », en cours de rédaction pour l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée) et la thèse de Dominique Courret « Caractérisation de la perturbation hydrologique induite par les régimes d'éclusées hydroélectriques et définition d'un indicateur – réflexion sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées sur les populations de poissons ». C'est dans cette thèse qu'est mis au point l'INPH (Indice de Niveau de Perturbation Hydrologique), outil utilisé dans le cadre de l'étude Cère pour caractériser le régime d'éclusées induit par Brugale et mesurer son intensité.

J'ai pu ensuite compiler les données nécessaires à l'analyse et reconstruire les données manquantes afin de constituer le jeu de données sur toute la chronique d'étude, à savoir 2012 (première année de pêche électrique sur la Cère) à 2023. Trois sources de données ont été exploitées :

- des données hydrologiques, à partir d'Hydroportail : station hydrométrique de la Cère à Gagnac-sur-Cère [Brugale] (P194 2910) située en aval direct du barrage ;
- des données thermiques, à partir de deux thermographes exploités par ECOGEA : un à Mespoulet-bas, 450 m en aval du barrage (celui qui nous a intéressé plus particulièrement dans ce rapport car situé au niveau de notre station de pêche salmonicole) et un à Port de Gagnac (à 4.7 km du barrage) qui a servi à reconstituer les données manquantes à Mespoulet-bas ;
- des données biologiques, à savoir l'abondance en truitelles par année à Mespoulet-bas depuis 2012, en nombre de truitelles pour 100 EPA (Echantillonnage Ponctuel d'Abondance, c'est-à-dire pour 100 posés d'anode, les pêches électriques sur la Cère se faisant par « pêche partielle », cf. annexe 7.2 pour plus de détail).

Enfin, ma formation préalable au sujet est passée par la réalisation d'un état de l'art sur les exigences biologiques de la truite en général et surtout des jeunes stades, ainsi que sur les effets de l'hydrologie, des éclusées et de la thermie. Cela m'a permis d'être armé pour la compréhension des différents ressorts qui pèsent sur une population de truites et pour expliquer les graphiques que j'ai réalisés par la suite.

4.2. Démarrage, déroulement de l'analyse exploratoire et synthèse

A partir de ce stade, j'ai pu initier l'analyse exploratoire du rôle des différents facteurs que sont **l'hydrologie globale influencée** (par la série d'ouvrages hydroélectriques jalonnant le cours de la Cère et ses affluents), le **régime d'éclusées** et la **thermie**, dans le succès du recrutement.

Dans un premier temps, je me suis attaché à décrire la variabilité interannuelle du recrutement en truitelles à Mespoulet-bas pour isoler des années de références (au succès de recrutement significativement supérieur aux autres années) et, au contraire, des années de recrutement particulièrement mauvais. La démarche de l'analyse est la suivante : **confronter les bonnes années de recrutement aux mauvaises** (en l'occurrence deux de chaque) pour en ressortir des enseignements quant à l'effet des trois facteurs.

Il a fallu passer par une phase de description de l'effet des crues sur la variabilité du recrutement pour retirer les années à crues de l'analyse et s'assurer que nos deux « bonnes » et « mauvaises » années ne

furent pas influencées par des crues ; les crues conditionnant grandement le succès du recrutement et masquant donc l'effet des autres facteurs.

Chaque facteur a été analysé finement, à l'échelle des **périodes biologiques**. Elles correspondent au découpage de l'année civile en fonction du cycle de vie de la truite et des espèces peuplant la Cère et sont détaillées en annexe 7.1. Sans cela, l'effet de certains facteurs sur la quantité de truitelles peut passer inaperçu à l'échelle annuelle alors qu'au contraire, il ressort particulièrement bien lorsqu'on cible une période précise du cycle de vie (émergence des alevins par exemple – P2 – cf. annexe 7.1).

L'analyse exploratoire s'est déroulée en trois compartiments analysés indépendamment dans un premier temps puis de manière conjointe dans la discussion pour dresser le bilan de leur influence et notamment de la part d'influence sur le recrutement de chacun d'entre eux.

Une fois l'analyse menée à bien et les **facteurs d'influence identifiés**, j'ai pu passer à la phase finale de synthèse et de **proposition de mesures** en vue de mitiger les impacts du fonctionnement par éclusées à Brugale.

4.3. Amélioration du protocole

Au cours de l'analyse exploratoire, j'ai redéfini la découpe d'une période biologique utilisée dans les études d'ECOGEA afin d'avoir des résultats plus éloquentes. J'ai ajusté la période P2 d'émergence des alevins de truite non pas au 01/03 mais à la date de début d'émergence théorique calculée grâce aux données de températures (détail du calcul en annexe 7.2). Cela a permis de faire ressortir le paramètre d'influence prépondérant, la fréquence des baisses d'éclusées, qui autrement ne ressortait pas avec la P2 initiale.

4.4. Synthèse des outils et savoirs mobilisés

Pour mener à bien l'étude, j'ai consacré une large partie de mon temps sur Excel. Je l'ai utilisé pour la création de très nombreux graphiques pour illustrer la variabilité de mon jeu de données ainsi que les liens entre chaque facteur et le recrutement en truitelles. Cela m'a permis de cerner quels paramètres semblait rentrer en ligne de compte dans le succès du recrutement.

Toujours sur Excel, j'ai eu l'occasion d'utiliser l'outil statistique XLSTAT pour tester des relations de corrélation et de tendance, et ainsi tester la significativité de mes relations.

J'ai aussi eu recours au logiciel QGIS pour le travail de cartographie et de représentation du jeu de données (sous forme de cartes), ou encore pour réaliser tout un lot de mesures (distance entre les stations de pêche, les thermographes et le barrage, largeur du lit mineur afin de calculer le niveau typologique des stations, etc.). Toujours sur QGIS, avec le module « Post Telemach », j'ai pu utiliser un modèle hydraulique de la Cère conçu par ECOGEA dans le cadre d'une ancienne étude pour extraire des données et des cartes de vitesses d'écoulement, entre autres.

Parmi les principaux savoirs que j'ai appris et/ou renforcés, je peux citer le cycle de vie de nombreuses espèces de poissons, en particulier la truite (mon espèce d'étude), mais aussi les lithophiles et l'ombre commun sur lequel j'ai débuté le même type d'étude que pour la truite et sur lequel je me suis formé en constituant un état de l'art.

Comme je l'ai expliqué dans la partie 4.1, je partais de zéro en matière de connaissances sur les éclusées, notion pourtant clé dans mon intitulé de stage. J'ai donc dû me former et je maîtrise désormais cette modalité d'exploitation des usines hydroélectriques, ses spécificités et ses incidences sur la vie aquatique.

5. Résultats et discussion

5.1. Synthèse des résultats

Comme vu dans la partie 4.2, nous avons comparé les bonnes années de recrutement aux mauvaises. On constate sur la figure suivante que deux années sortent nettement du lot, 2014 et 2017. De façon logique, vu leur niveau de recrutement nettement supérieur, elles n'ont pas subi de crues et peuvent donc être considérées comme nos références « bonnes années ». A contrario, trois années se détachent par le bas, dont une ayant subi une crue hivernale (2018) : 2013 et 2023 ont donc constitué nos deux « mauvaises années ».

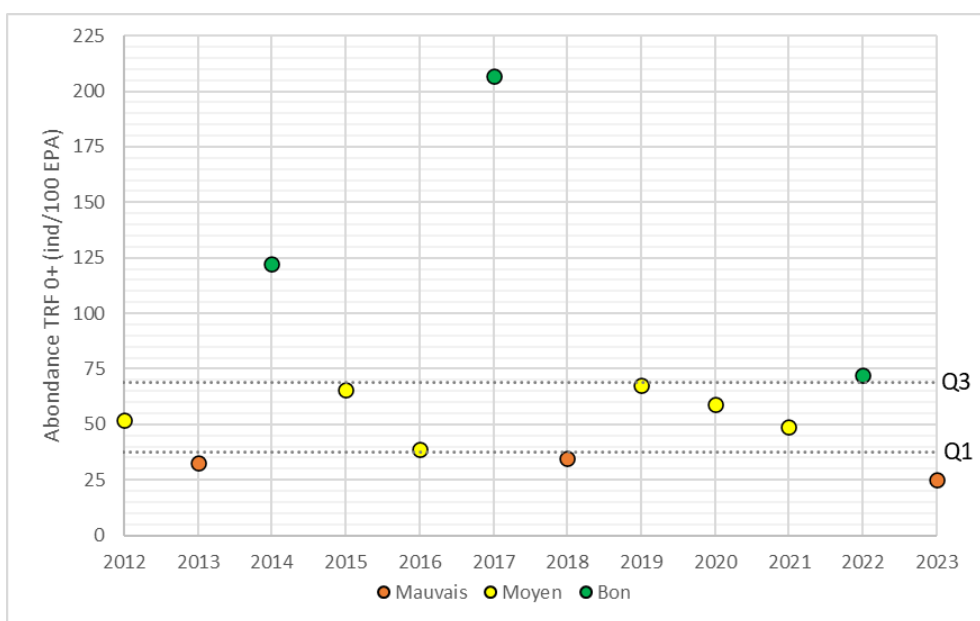


Figure 4 : Discretisation des classes d'abondance en juvéniles de truite sur la station « Mespoulet-bas »

C'est en comparant ces deux paires d'années que nous avons pu mettre en évidence que le recrutement était défavorisé par :

1. les fortes quantités d'eau à partir du début d'émergence jusqu'en fin de P3 (30/06),
2. les baisses d'éclusées et plus précisément une fréquence élevée des baisses post émergence jusqu'en fin de P3 (30/06),
3. la thermie en dehors du préférendum biologique chez les juvéniles de truite.

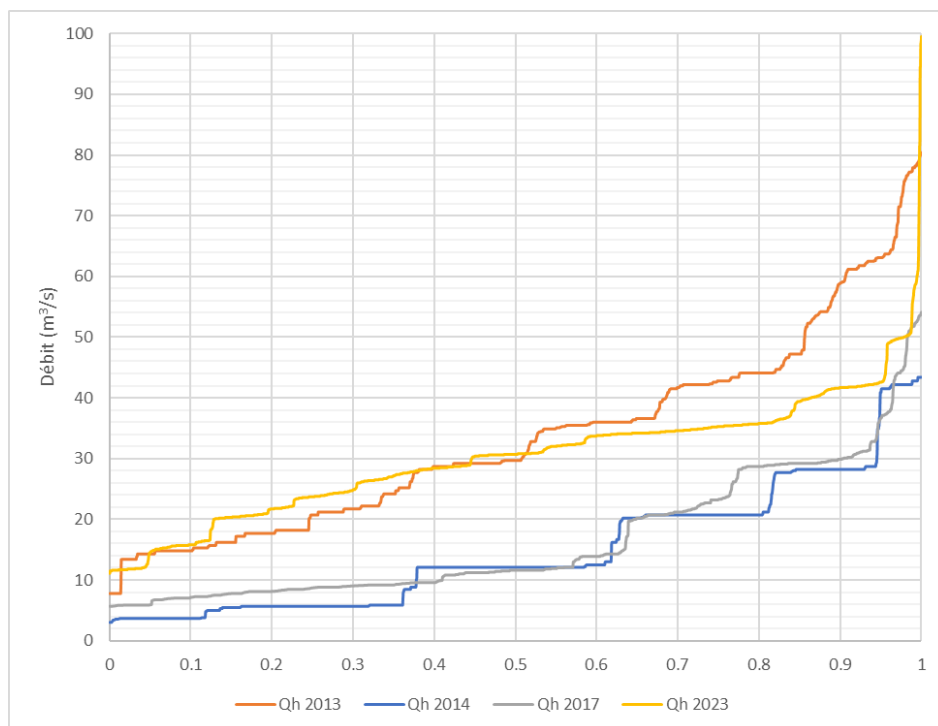


Figure 5 : Courbes des débits horaires à Brugale classés, du début d'émergence théorique à la fin de P3 (30/06)

1. Sur la Figure 5, la différence entre les bonnes et les mauvaises années de recrutement est très claire, avec les paires 2014-2017 (bon recrutement) et 2013-2023 (mauvais recrutement) qui se séparent nettement. Les bonnes années sont caractérisées par des débits printaniers qui restent le plus souvent faibles, alors qu'ils sont plus forts en intensité et en durée les mauvaises années. Les forts débits post émergence sont donc défavorables au recrutement ce qui s'explique par des phénomènes de **dérive forcée** des alevins.

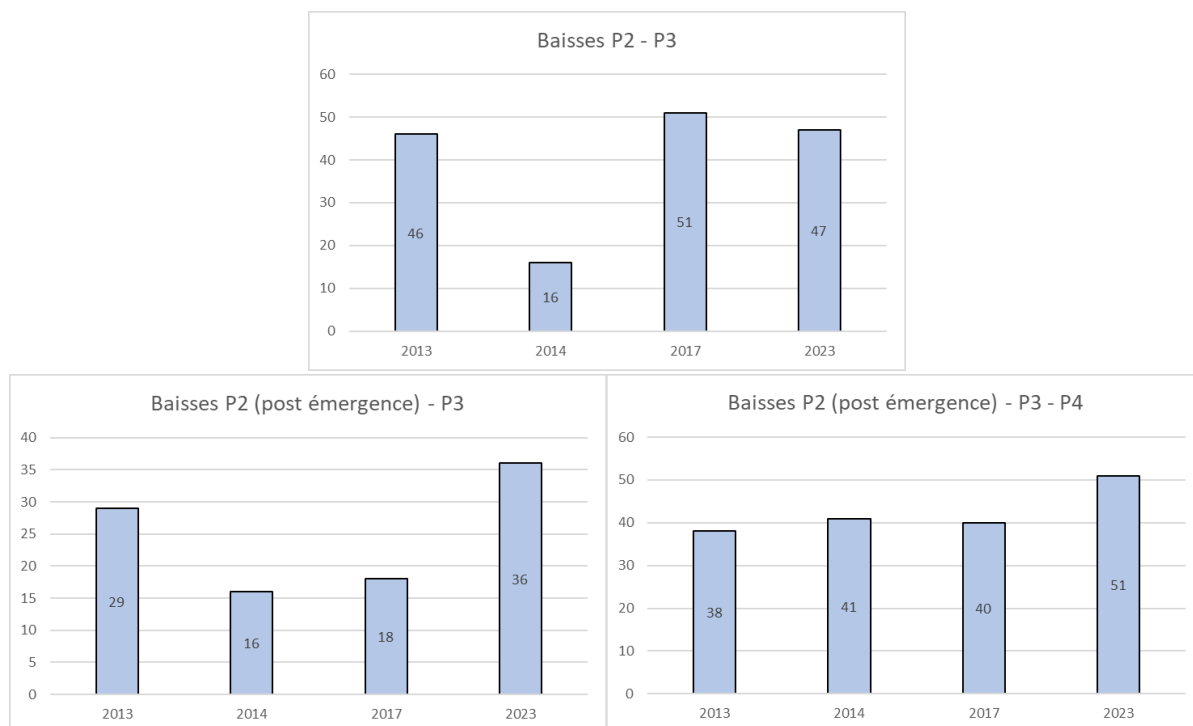


Figure 6 : Nombre de baisses d'écluesées. La mention « (post émergence) » indique que seules les baisses ayant eu lieu à partir de la date de début d'émergence théorique des alevins sont comptabilisées

2. On constate sur la Figure 6 que tant que l'émergence n'a pas commencé, la fréquence des baisses d'éclues ne conditionne pas le recrutement, 2017 étant la meilleure année de recrutement et celle avec le plus grand nombre d'éclues en P2-P3. Alors que si l'on ne compte que les baisses post émergence, les deux paires d'années se reforment de façon nette et évidente : 2013 et 2023 comptabilisent presque le double de baisses que les deux bonnes années. En revanche, si l'on ajoute la P4, les quatre années s'homogénéisent ce qui montre qu'au bout d'un certain temps, les alevins deviennent suffisamment développés pour faire face aux variations de débit.

Tableau 1 : Températures moyennes maximales sur trente jours consécutifs à Mespoulet-bas – tolérance du stade « juvénile » : optimum minimal, maximal et seuil de mortalité – Vert : dans l'optimum thermique ; jaune : écart inférieur à 1 degré ; orange : écart supérieur à 1 degré (adapté du « projet TIGRE » de INRAE - Université de Tours - OFB)

Année	T30Jmax	Opt. min.	4
2013	17.1	Opt. max.	17
2014	16.6	Mortal.	25
2017	16.8		
2023	18.2		

Tableau 2 : Nombre de jours supérieurs et nombre maximal de jours consécutifs supérieurs à l'optimum thermique chez la juvénile de truite (17°C)

Année	Nb jours >17°C	Nb max jours consécutifs >17°C
2013	16	12
2014	7	8
2017	24	7
2023	53	28

3. La température moyenne maximale sur trente jours consécutifs entraîne une réduction significative de la quantité d'alevins lorsqu'elle dépasse les 17.5-18°C (Baran et al., 1999; Elliott & Elliott, 1995). La thermie a donc participé au mauvais recrutement observé en 2023 (Tableau 1). Cela se voit aussi sur le nombre de jours où la température moyenne est supérieure à l'optimum thermique chez la truitelle (Tableau 2) : 53 jours en 2023 soit deux fois plus qu'en 2017, la meilleure année de recrutement, et quasiment deux mois (et un mois en jours consécutifs !).

Cela étant dit, de nombreux autres paramètres ont été étudiés dans le cadre de l'étude et notamment les caractéristiques des éclues (gradients, amplitude, etc.). Ce n'est pas parce qu'ils ne sont pas ressortis au travers des graphiques qu'ils n'ont pas d'influence et qu'ils n'ont pas structuré le recrutement. C'est pourquoi nous avons tout de même tenu à proposer des mesures de mitigations sur d'autres facteurs que ceux évidents (fréquence des baisses) par principe de précaution, en se calant sur les caractéristiques observées en 2014 et 2017 :

- Fixation d'un quota de **20 baisses maximum entre le 01/03 et le 30/06.**
- Débit maximum post émergence : **35 m³/s du 01/03 au 31/03 puis 24.5 m³/s du 01/04 au 30/06.**
- Gradients maximaux post émergence : **7 m³/s/h à la baisse du 01/03 au 15/05 et 17.5 m³/s/h à la hausse du 01/03 au 30/06.**

5.2. Regard critique et réflexions personnelles

J'ai pu montrer que les trois facteurs étudiés avaient un impact, mais certaines questions restent en suspens. Par exemple, il est difficile de déterminer lequel des trois a le plus d'influence sur le recrutement. Si l'on prend le cas de la température, nos deux bonnes années sont les seules du jeu de données à être thermiquement favorables et sans crue. Le recrutement n'est-il donc qu'une question de thermie (sous réserve qu'il n'y ait pas de crue bien sûr) ? Ou au contraire est-ce que le recrutement fut bon en 2014 et 2017 du fait de la faible hydraulicité printanière en comparaison à 2013 et 2023 ? On ne peut, en l'état, pas répondre à cette question. Il faudrait attendre et espérer que des années thermiquement favorables et à la fois ne subissant ni de crues ni d'écluesées en trop grande fréquence se produise pour qu'on puisse faire avancer la question (ce type d'année ne s'étant pas produit entre 2012 et 2023).

Il se trouve que la station de pêche que j'ai étudiée n'était pas celle sur laquelle ECOGEA avait fait une modélisation hydraulique par le passé. Cela a limité le potentiel d'approfondissement de l'étude. En effet, nous n'avons pas pu investiguer certains champs qui paraissent pertinent de prime abord, comme des notions de degré et de fréquence de dénoisement des frayères, ou bien de variation de la surface pondérée utile (SPU) en fonction du débit au cours de l'année. Cela aurait pu permettre, par exemple, de proposer un seuil de débit en période d'incubation à garantir pour conserver un niveau d'enneigement des frayères satisfaisant comme cela a pu être fait sur la Maronne ; sur laquelle le relèvement des débits minimaux a permis d'améliorer le recrutement.

D'un point de vue plus personnel, la première mesure de mitigation que j'ai proposée est une nouveauté, aucune mesure du genre n'ayant été expérimenté ni sur la Maronne ni sur la Dordogne. Je suis donc particulièrement curieux de voir si, d'une part, EDF pourrait accepter de s'y plier, et, d'autre part, de voir quel effet pourrait donner une telle mesure sur le recrutement à l'avenir.

Honnêtement, je n'aurais pas osé cantonner l'analyse à deux bonnes et mauvaises années. J'aurais eu tendance à penser que ce serait trop réducteur pour obtenir des résultats « solides », et dommage de ne pas exploiter la totalité du jeu de données. Mais forcé de constater que ça permet de trouver plus rapidement des résultats et que ça facilite grandement le processus d'analyse (on peut rentrer dans le détail des années sélectionnées et cela évite de se mélanger et de se perdre dans le jeu de données qui en l'occurrence intégrait douze années tout de même). En effet, je m'étais lancé au début dans des matrices de corrélation de Spearman sur l'intégralité du jeu de données qui n'ont pas donné grand-chose, le nombre de paramètres étant trop grand rendant l'explication et la lisibilité des résultats difficile.

Je voudrais ajouter que je trouve ça gratifiant de savoir que son travail va pouvoir servir à faire avancer les choses et que je me suis senti utile au travers de ce travail.

6. Conclusion

J'ai produit un rapport détaillant le jeu d'effets qu'exerce le complexe d'aménagements hydroélectriques sur le bassin de la Cère sur les conditions d'habitat pour la faune aquatique en aval du barrage de Brugale. J'ai pu montrer un certain nombre d'impacts qui empêchent aujourd'hui d'avoir un bon niveau de recrutement (définition de « bon niveau » dans le livrable – annexe 7.2), hors années exceptionnelles. Cela a donné lieu à la proposition de trois mesures de mitigation de l'impact du régime d'éclusées. Cette étude constituera un support de discussion avec EDF, qui exploite l'usine de Brugale, pour faire avancer les choses et réduire l'incidence des éclusées sur la Cère voire même sur d'autres bassins s'il s'avérait que les mesures proposées fournissent de réels gains écologiques. A l'avenir, ECOGEA perpétuera ce type d'analyse sur d'autres espèces, à commencer par l'ombre commun (sur lequel j'ai déjà amorcé l'étude), puis sur les autres espèces électives de la Cère aval. Le but est, à termes, de parvenir à protéger l'ensemble du cortège piscicole en aval des ouvrages hydroélectriques pratiquant un régime d'éclusées.

Ce stage fut l'occasion pour moi de développer diverses compétences qui me seront assurément très utiles dans la suite de mon parcours professionnel. La principale qui me vient à l'esprit est la rédaction d'études complexes, qui passe par la constitution d'un plan structuré et organisé, et qui m'a permis le développement de compétences rédactionnelles et de vulgarisation/synthèse. La deuxième principale compétence que j'ai mobilisée est le traitement de données diverses et variées (débit, thermie, abondances en truitelles) et la reconstitution de données manquantes. Cela passe par la gestion du jeu de données (complétude, formatage et triage) et sa manipulation pour en extraire des résultats.

J'ai pu aussi développer ma maîtrise de certains logiciels et découvrir de nouveaux outils. En effet, j'ai approfondi ma maîtrise de la suite Office et surtout Excel (traitement et mise en forme de données) et Word (mise en page et conception d'un rapport), ce qui m'a permis de gagner en efficacité et autonomie en découvrant de nouvelles fonctionnalités et raccourcis. J'ai découvert de nouveaux outils comme l'extension « Post Telemach » (qui permet de visualiser des modélisations hydrauliques sur QGIS) et le logiciel Habby (qui permet la création de courbes de surface pondérée utile en fonction des préférences d'habitat d'une espèce), outils qui complètent mon arsenal et qui pourront s'avérer utiles pour moi dans le futur.

Enfin, cette expérience professionnelle m'a appris à se conformer à des attentes, en l'occurrence le livrable commandé par l'entreprise, et à y répondre de façon la plus fidèle possible. Cela passe par le dialogue avec les différentes parties prenantes, autre compétence fondamentale pour mon futur professionnel.

A présent, deux choix s'offrent à moi en matière de professionnalisation : poursuivre dans la voie de l'hydrobiologie, soit en bureau d'étude, soit en fédération de pêche ; ou bien m'orienter dans une autre voie qui m'intéresse tout autant, celle de la restauration des milieux aquatiques, en intégrant un bureau d'étude ou un syndicat de rivière. Cela étant dit, cela dépendra surtout des offres et opportunités qui se présenteront à moi.

7. Annexes

7.1. Annexes 1 : Périodes biologiques sur le bassin de la Dordogne définies par ECOGEA

Période biologique	Dates	Phases associées
P1	1er janvier - 28 février	Incubation des œufs et phase de vie intra-gravellaire des alevins de truite
P2	1er mars - 15 mai	Emergence des alevins de truite - Reproduction puis début d'émergence des alevins lithophiles précoces
P3	16 mai - 30 juin	Vie en eau libre des alevins de truite et de lithophiles précoces - Reproduction des lithophiles printaniers
P4	1er juillet - 15 septembre	Vie en eau libre des alevins de l'ensemble du cortège
P5	16 septembre - 31 octobre	Période automnale
P6	1er novembre - 31 décembre	Reproduction des truites

7.2. Annexe 2 : Rapport de l'étude Cère – livrable final

Liste des sigles et glossaire

Sigles :

ANR : Apports Naturels Reconstitués

EDF : Electricité De France

SPU : Surface Pondérée Utile

C2, C5, C10 : Crue biennale, quinquennale, décennale

EPA : Echantillonnage Ponctuel d'Abondance

EPIDOR : Etablissement public territorial du bassin de la Dordogne

Habby : HABitat suitaBilitY

INPH : Indice de Niveau de Perturbation Hydrologique de Courret (2014), abrégé « indice éclusées »

NTT : Niveaux Typologiques Théoriques

Qh : Débits horaires

QmaxPx : Débit maximum rencontré à une période donnée d'une année donnée

Qtvar : Débits à pas de temps variables

QMNAx : Débit Mensuel Minimal de chaque Année civile, avec x la période de retour (2 ans, 5 ans)

QMJ : Débit Moyen Journalier

Qsp : « Débit spécifique », débit par unité de superficie de bassin versant

SFR : Surface Favorable à la Reproduction

SIEAG : Système d'Information sur l'Eau Adour Garonne

Th : Température horaire

TMJ : Températures Moyennes Journalières

TMM : Températures Moyennes Mensuelles

TRF : Truite fario ou commune (*Salmo trutta fario*)

Glossaire :

Ecrêtement : atténuation, diminution

Période de retour : probabilité de retour d'une crue chaque année, une crue dont la période de retour est de 10 ans a chaque année 1 chance sur 10 de se produire

Table des matières

Liste des sigles et glossaire	1
Table des matières.....	2
1. Problématique	4
2. Localisation géographique.....	5
3. Les aménagements hydroélectriques de la Cère.....	6
3.1 L'hydroélectricité en France	6
3.2 La chaîne d'aménagements hydroélectriques de la Cère	8
3.3 Focus sur l'aménagement de Brugale.....	9
4. La gestion par éclusées et ses conséquences sur les peuplements piscicoles	10
4.1 Définition du régime d'éclusées	10
4.2 Conséquences des éclusées sur les poissons	11
4.2.1 Le risque de piégeage-échouage	11
4.2.2 Le risque d'exondation de frayères.....	12
4.2.3 Le risque d'instabilité hydraulique	13
4.2.4 Compartimentation de l'année en périodes biologiques de différentes sensibilités vis-à-vis des éclusées	13
5. Présentation des jeux de données	16
5.1 Données piscicoles	16
5.2 Données hydrologiques	18
5.3 Données thermiques	18
6. Influence des aménagements sur l'hydrologie.....	19
6.1 Données de synthèse de l'hydrologie influencée.....	19
6.2 Influence des aménagements hydroélectriques sur les crues	20
6.3 Influence des aménagements hydroélectriques sur les bas débits.....	22
6.4 Le régime d'éclusées.....	23
6.4.1 Présentation de l'indicateur éclusées (Courret, 2014)	23
6.4.2 Résultats de l'indicateur éclusées sur l'hydrologie de la Cère à Brugale.....	25
7. Influence des aménagements hydroélectriques sur la thermie.....	27
7.1 Synthèse des données thermiques	27
7.2 Catégorie de cours d'eau	28
7.2.1 Typologie de Verneaux	28
7.2.2 Zonation de Huet (règle des pentes)	30
7.2.3 Discussion	31

8.	Influence des aménagements sur le recrutement en truites	32
8.1	Présentation globale du peuplement à Mespoulet-bas	32
8.2	Variabilité interannuelle du recrutement en truites	32
8.3	Effet des crues sur le recrutement	34
8.4	Analyse de la variabilité des années sans crues	36
8.4.1	Comparaison des hydrologies influencées	36
8.4.2	Comparaison par rapport à la situation hydrologique naturelle	42
8.4.3	Comparaison des régimes d'éclusées	45
8.4.4	Comparaison des régimes thermiques	51
8.5	Synthèse des paramètres gouvernant le plus le recrutement en truites sur la Cère en aval de Brugale et discussion	56
9.	Perspectives et proposition de mesures de mitigation au niveau du barrage de Brugale	57
9.1	Synthèse de la situation et des impacts des aménagements	57
9.2	Proposition de mesures de mitigation	58
9.3	Objectifs hydrologiques et biologiques	60
10.	Résumé	62
11.	Bibliographie	63
12.	Annexes	67
12.1	Synthèse des étapes de la méthode de sélection des éclusées et de classement de la perturbation hydrologique (Courret, 2014)	67
12.2	Répartition longitudinale (au sens biotypologique) des abondances optimales potentielles de 40 espèces (Degiorgi & Raymond, 2000)	68
12.3	Synthèse des dates théoriques du cycle de vie de la truite – station de Mespoulet-bas	69
12.4	Liste des codes poissons utilisés	70
12.5	Courbes des débits moyens mensuels (mars à juin) classés de 1994 à 2024 – tableaux des fréquences de non dépassement	71
12.6	Courbes des débits classés au mois de mars de 2019 à 2024	73

1. Problématique

Le complexe hydroélectrique de l'amont du bassin de la Dordogne et de ses affluents (Maronne, Cère, Vézère) est un outil stratégique national pour la production énergétique et la sécurité du réseau (Convention éclusées 2019-2021). Il compte 52 barrages, pouvant stocker près d'un milliard de mètres cubes d'eau, qui alimentent 28 usines pour une puissance totale de 1 800 MW (soit quasiment la consommation de 700 000 foyers). Ces dernières fonctionnent par « éclusées », désignant les fluctuations artificielles du débit dans les cours d'eau provoquées par le démarrage et l'arrêt du turbinage par les centrales hydroélectriques (Courret et al., 2012).

De nombreux suivis et études ont été menées sur ce bassin pour mieux appréhender les effets des éclusées et leurs mécanismes d'actions sur le peuplement piscicole.

- suivi du peuplement piscicole par pêche électrique, avec une attention particulière portée aux juvéniles de l'année (« 0+ », plus sensibles aux éclusées),
- suivi de la reproduction des grands salmonidés,
- modélisations hydrauliques des secteurs les plus sensibles,
- effets du rehaussement des débits minimaux sur l'exondation des frayères,
- suivis des interactions entre fluctuations des niveaux d'eau et cycles biologiques de différentes espèces piscicoles.

Ces études ont permis de proposer, en concertation avec l'ensemble des acteurs concernés (Electricité De France (EDF), l'Etablissement Public Territorial du Bassin de la Dordogne (EPIDOR), l'association Migrateurs Garonne Dordogne (MIGADO), l'Etat Français, ses administrations et services, ses collectivités territoriales, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG), les organismes en charge de la protection et/ou gestion des milieux aquatiques) des mesures de mitigation des impacts des éclusées (réduction des vitesses de variation des débits, fixation de seuils de débits selon les périodes de l'année et la sensibilité des espèces, aménagement de la morphologie des sites sensibles pour réduire le risque de piégeage-échouage des espèces, etc.) établies dans le cadre de « conventions éclusées » (hors aménagements morphologiques).

A l'heure actuelle, les mesures de mitigations sur la Cère ne sont pas aussi avancées que sur la Dordogne ou la Maronne et leurs impacts restent importants, matérialisés lors des suivis écologiques notamment par des problèmes de mises en eau des zones de frai d'espèces piscicoles patrimoniales.

Ce rapport a pour objectif d'identifier les interactions entre la gestion des aménagements hydroélectriques, en particulier le dernier aménagement de la chaîne hydroélectrique, le barrage de Brugale et le recrutement en truite sur la Cère à l'aval. Pour ce faire, nous nous appuierons notamment sur une analyse fine des données piscicoles, hydrologiques et thermiques récoltés sur la période 2012-2023 afin de **proposer des mesures de mitigation visant à améliorer la situation.**

Le présent rapport porte sur l'espèce « truite fario » mais des investigations sont déjà en cours sur l'ombre commun. D'autres espèces pourront par la suite être investiguées pour décrire l'impact des éclusées sur le peuplement dans son ensemble.

2. Localisation géographique

La Cère est un affluent rive gauche de la Dordogne. Elle s'écoule d'Est en Ouest sur 120 km. Son bassin versant s'étend sur 1054 km² et représente 4.3% du bassin de la Dordogne. La Cère reçoit deux affluents principaux :

- La Jordanne (39 km, bassin versant : 157 km²)
- L'Authre (36 km, bassin versant : 111 km²)

La Cère traverse trois départements : le Cantal dans lequel elle prend sa source sur la commune de Saint-Jacques-des-Blats à 1370 m d'altitude, la Corrèze puis le Lot où elle se jette dans la Dordogne à Prudhomat (126 m d'altitude).

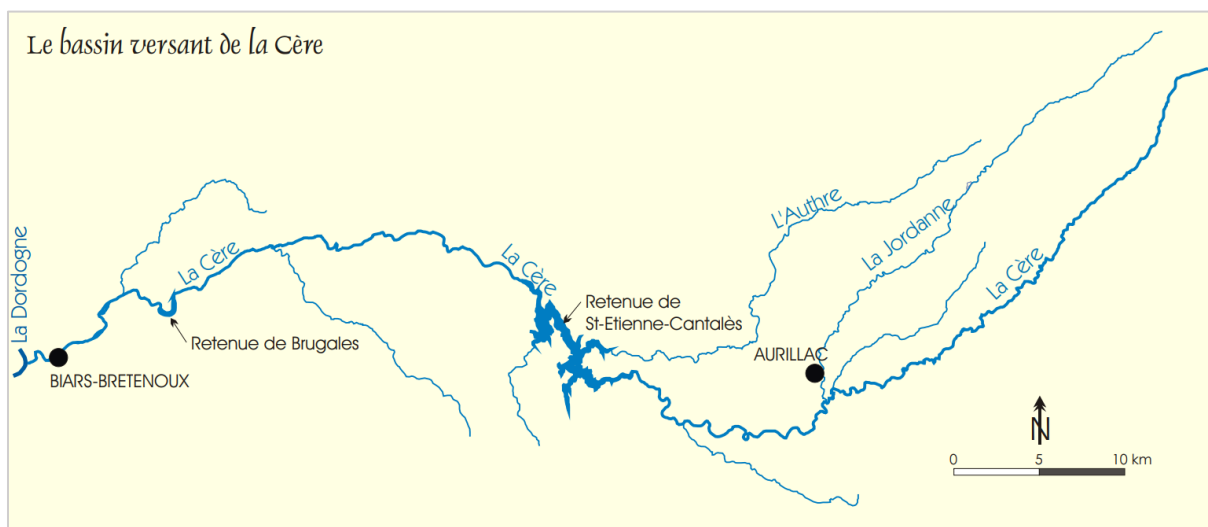


Figure 7 : Réseau hydrographique de la Cère (Comité de rivière Cère & EPIDOR, 2000)

La Cère s'écoule sur un socle géologique varié représenté surtout par des formations métamorphiques depuis le haut bassin jusqu'aux quelques derniers kilomètres avant la confluence avec la Dordogne où elle traverse une plaine plus ouverte sur formations calcaires.

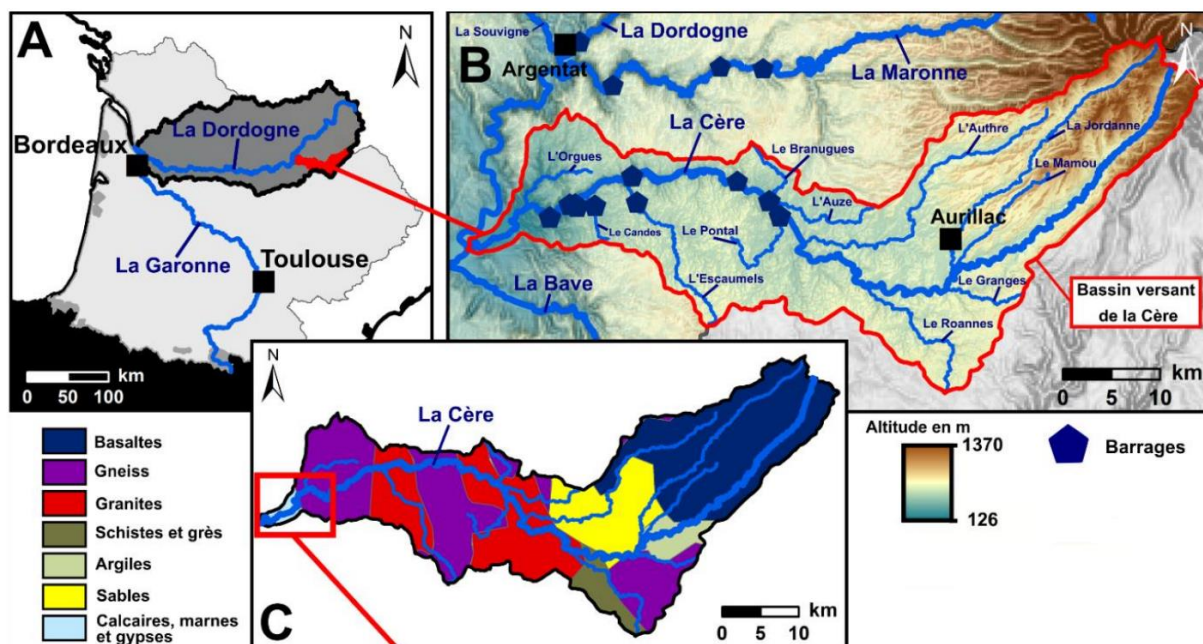


Figure 8 : A) Localisation du bassin versant de la Cère - B) Topographie, réseau hydrographique et localisation des principaux barrages réservoirs - C) Géologie simplifiée du bassin versant. Le site d'étude est encadré en rouge (Boutault, 2023)

3. Les aménagements hydroélectriques de la Cère

3.1 L'hydroélectricité en France

L'hydroélectricité couvre 11% de la production métropolitaine d'électricité, à la deuxième place derrière le nucléaire (70%) (EDF). L'hydroélectricité représente plus de la moitié (53%) de la production d'électricité renouvelable en France (Figure 9).

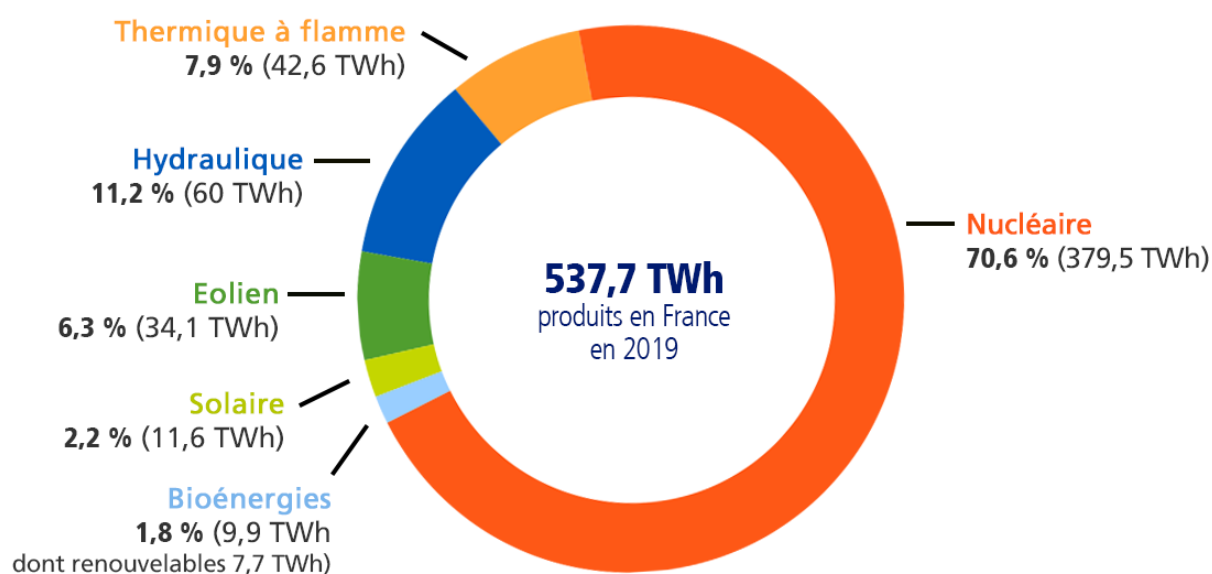


Figure 9 : La production française d'électricité en 2019 (RTE - bilan électrique 2019)

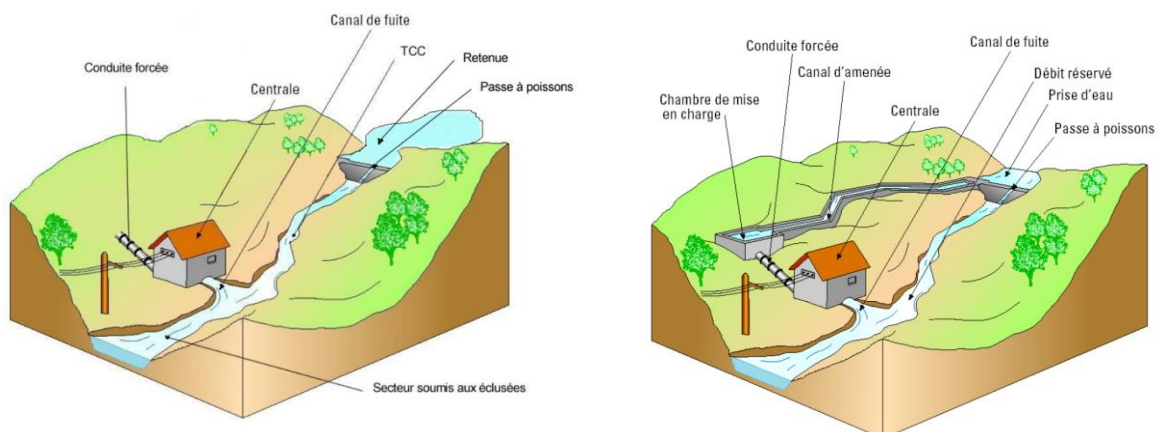
La puissance installée de l'hydroélectricité en France métropolitaine est de 25.9 GW (EDF), ce qui fait de la France le 2^e pays européen avec la plus grande capacité hydroélectrique installée (ADEME). L'hydroélectricité se situe dans sa phase de maturité technique, économique, industrielle et

commerciale avec un taux de croissance faible (ADEME). En d'autres termes, cela signifie qu'on a déjà installé la totalité de ce qu'il est possible de faire en matière de grands barrages et que la marge de manœuvre pour continuer à développer cette filière est limitée.

On distingue plusieurs types d'installations hydroélectriques en fonction de la durée de remplissage de leur réservoir (Ministère de la transition énergétique et de la cohésion des territoires) :

- les installations dites « au fil de l'eau », qui turbinent tout ou partie du débit d'un cours d'eau en continu. Leur capacité de modulation est très faible et leur production dépend du débit des cours d'eau.
- les installations dites par « éclusées », qui disposent d'une petite capacité de stockage, typiquement comprise entre 2 heures et 400 heures de production. Ces installations permettent une modulation journalière ou hebdomadaire de la production en accumulant dans leurs retenues des volumes d'eau qui seront turbinés pendant les pics de consommation.
- les installations dites « centrale de lac » disposant d'une retenue plus importante. Ces installations accumulent des volumes d'eau dans des retenues de taille conséquente nécessitant le plus souvent des barrages de grande taille, généralement à l'aval des moyennes et hautes montagnes. Ces installations permettent de diminuer l'exposition aux conditions hydrologiques.
- les « stations de transfert d'énergie par pompage » ou STEP, utilisées pour le stockage de l'énergie électrique : ces installations permettent de pomper pendant les périodes de moindre consommation d'électricité vers un réservoir haut des volumes d'eau pour les turbiner pendant les pics de consommation.

Les installations au fil de l'eau fournissent une hydroélectricité de base peu modulable alors que les installations avec des retenues importantes sont très utiles pour la flexibilité du système électrique, et permettent de répondre aux pics de consommation : en effet, ces installations peuvent fournir de grandes puissances très rapidement mobilisables (quelques minutes).



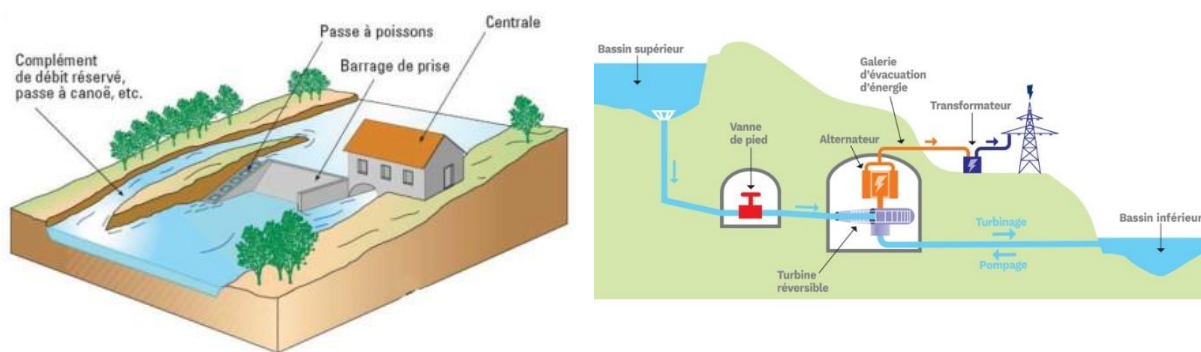


Figure 10 : Schéma d'une centrale de haute (haut gauche), moyenne (haut droite) et basse chute (bas gauche), et d'une STEP - EDF

L'aspect « pilotable » de l'hydroélectricité est un atout de taille par rapport aux autres énergies renouvelables comme l'éolien ou le solaire qu'on qualifie d'énergies « fatales » et dont l'électricité est perdue si on ne l'utilise pas au moment où elle est produite.

En revanche, l'exploitation des centrales par éclusées implique des variations importantes de débit en aval des usines et induit tout un lot de perturbations qui seront détaillées et illustrées tout au long de ce rapport.

3.2 La chaîne d'aménagements hydroélectriques de la Cère

La Cère est une rivière largement utilisée pour la production hydroélectrique, plusieurs aménagements à ces fins y sont implantés :

- Le barrage-usine de St-Etienne-Cantalès, mis en service en 1945, d'une capacité totale de **133.5 millions de m³**. En considérant le module de la Cère à la station de Nèpes (en aval proche de St-Etienne-Cantalès, module de 10.5 m³/s), il faudrait 150 jours, soit quasiment **5 mois pour remplir complètement la retenue de St-Etienne-Cantalès !**
- Le barrage-usine de Nèpes, datant de la même année, avec 1.9 millions de m³ de capacité totale,
- La centrale de Lamativie, mise en service en 1927, alimentée par la prise d'eau de Montvert,
- La centrale de Laval-de-Cère 1 (1931) qui turbine les eaux restituées par Lamativie dans la prise d'eau de Camps,
- La centrale de Laval-de-Cère 2 (1967), dont la retenue (Candes, 3.7 millions de m³) collecte une partie de l'eau de la retenue de Nèpes, de la prise d'eau sur l'Escaumels et du ruisseau de Candes, ces derniers étant deux affluents de la Cère en rive gauche,
- Puis enfin le barrage-usine de Brugale, mis en service en 1967, d'une capacité de 1.2 millions de m³ (Comité de rivière Cère & EPIDOR, 2000).



Figure 11 : Complexe hydroélectrique de la Cère (Comité de rivière Cère & EPIDOR, 2000)

En cumulé, le complexe hydroélectrique de la Cère se porte à près de 260 MW de puissance maximale installée, **soit environ ¼ de réacteur nucléaire. Cela équivaut à la consommation d'environ 100 000 foyers** (un réacteur équivalant à 400 000 foyers – EDF).

3.3 Focus sur l'aménagement de Brugale

D'une hauteur inférieure à 10 m pour 170 m de large, le barrage de Brugale est le dernier aménagement de la chaîne hydroélectrique de la Cère. **La particularité de la centrale de Brugale est son fonctionnement par écluses malgré le faible volume de la retenue.** Cela est permis par le stockage effectué plus en amont sur le bassin avec la retenue de St-Etienne-Cantalès. C'est un barrage-usine, c'est-à-dire que les eaux y sont directement turbinées puis aussitôt restituées en pied de barrage. La Cère n'est donc pas court-circuitée en aval de l'aménagement. L'usine comporte sept turbines de 7 m³/s chacune dont une adaptable aux bas débits et pouvant fonctionner à 3.5 m³/s, portant ainsi la capacité maximale de turbinage à environ 50 m³/s. Au-delà, l'eau franchit le barrage par surverse. La législation impose ce qu'on appelle un « débit réservé » à l'aval de tout ouvrage hydraulique afin de garantir un écoulement compatible avec la vie aquatique et le partage équitable de la ressource en eau. Il est fixé à 2.6 m³/s en aval de Brugale.



Figure 12 : Barrage-usine de Brugale sur la Cère aval (A. Rougeyres)

4. La gestion par éclusées et ses conséquences sur les peuplements piscicoles

4.1 Définition du régime d'éclusées

Une éclusée est une fluctuation artificielle du débit provoquée par le démarrage et l'arrêt du turbinage des centrales hydroélectriques conçue pour répondre aux pics infra-journaliers de la demande d'électricité. Ces fluctuations sont considérablement plus élevées, plus rapides et plus fréquentes que celles qui caractérisent les rivières en régime naturel (Bejarano et al., 2017; Boavida et al., 2013; Courret, 2014; Courret et al., 2012; Ladoux, 2021). On parle de « hausses » et de « baisses » d'éclusées.

Dans une modalité de gestion par éclusées, où se succèdent des phases de stockage et de déstockage de volumes d'eau contenus dans la retenue, les aménagements hydroélectriques entraînent des variations non naturelles du débit en aval. Ces opérations conduisent à la modification globale de l'hydrologie aussi bien en période de hautes eaux que d'étiage comme on peut le constater sur la figure suivante.

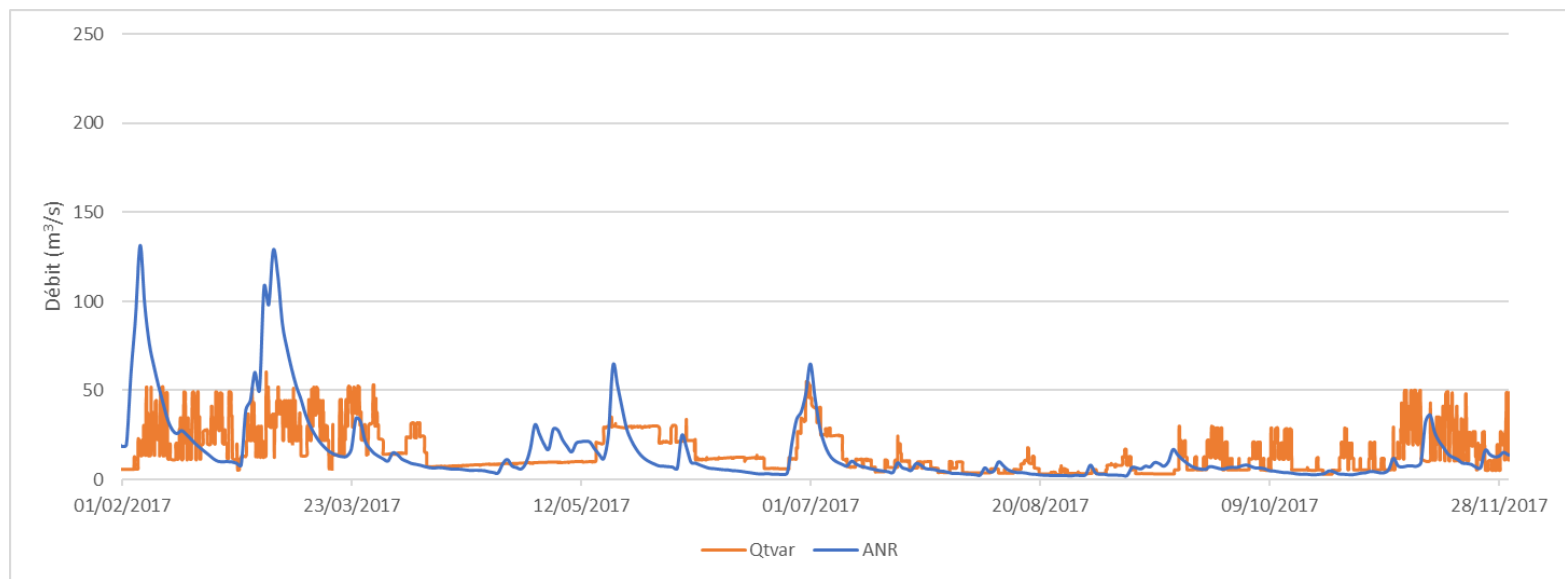


Figure 13 : Comparaison des hydrogrammes de la Cère en aval de Brugale en situation réelle influencée par les aménagements hydroélectriques (Qtvar), par rapport à la situation naturelle théorique sans aménagements (ANR)

4.2 Conséquences des éclusées sur les poissons

4.2.1 Le risque de piégeage-échouage

Avec la montée rapide du niveau d'eau lors d'une hausse d'écluse, de nombreux habitats habituellement hors d'eau peuvent se retrouver submergés offrant ainsi un habitat exploitable par les poissons et notamment les alevins qui cherchent à éviter les fortes vitesses du chenal principal.

Or, consécutivement au retrait de l'eau lorsque le débit retrouve son niveau de base, les individus s'étant abrités dans ces zones peuvent se retrouver piégés (au moins jusqu'à la prochaine montée d'eau suffisamment importante) ce qui peut conduire à leur mort sous l'effet d'un stress thermique, manque d'oxygène dissous, de la prédation voire de l'assec de la poche d'eau (cas de l'échouage) (Hoffarth, 2004).

On distingue trois types de zones sensibles au piégeage :

- les bancs alluviaux à faible pente latérale sur lesquels ou au bord desquels peuvent se trouver des dépressions,
- les chenaux et bras secondaires, naturellement déconnectés en dessous d'un certain seuil de débit,
- et les bordures de chenal constituées de blocs et/ou d'hélophytes.



Figure 14 : Vairon échoué dans un chenal secondaire de la Cère en aval de Port de Gagnac (A. Rougeyres)

On comprend donc bien que plus le gradient de baisse est rapide, plus cela est propice au piégeage, et que le risque de piégeage est d'autant plus important que les débits de base des éclusées sont faibles et les amplitudes fortes (Baran, 2023). Il y a aussi une notion de durée d'immersion des habitats piégeux : plus celle-ci est prolongée, plus les mortalités sont importantes car la faune aquatique a eu le temps de coloniser ces milieux et s'y installer sur la durée.

4.2.2 Le risque d'exondation de frayères

Que ce soit pour les espèces lithophiles qui se reproduisent sur le substrat minéral du cours d'eau ou les phytophiles qui fraient sur les supports végétaux dans le chenal et à ses abords, chaque baisse qui survient peut mener à l'exondation des sites de frai et peut occasionner des dégâts dont l'effet varie selon la durée de mise en assec. Chez les salmonidés par exemple, Neitzel & Becker (1985) observent des mortalités de 100% chez les alevins en fin de résorption de vésicule pour des exondations de 6h et de 48h pour des larves vésiculés. Les œufs peuvent en revanche survivre à des exondations de plus de 15 à 20 jours (à condition que l'humidité dans le substrat persiste et qu'il n'y ait pas de gel).

Il convient de rappeler que plusieurs poissons de la Cère (truite, ombre commun, vandoise, etc.) sont protégés en vertu de l'article 1 de l'arrêté du 8 décembre 1988 fixant la liste des espèces de poissons protégées sur l'ensemble du territoire national, et que donc « la destruction des œufs [...] sont interdits en tout temps » (Légifrance).



Figure 15 : Nid d'ombre commun exondé sur la Cère avec œufs au stade œillet (A. Rougeyres)

4.2.3 Le risque d'instabilité hydraulique

Ce phénomène renvoie à la notion de « dérive forcée » : lors des épisodes de hausse, l'augmentation parfois brutale des vitesses consécutives à l'augmentation du débit peut conduire à l'entraînement des individus vers l'aval. Cela peut conduire à des mortalités si les individus ne retrouvent pas d'habitats favorables (Baumann & Klauss, 2003). Les juvéniles se répartissent dans le chenal en fonction de leurs exigences en termes de hauteur d'eau (H), de vitesse (V) et de substrat (S). En un temps donné se trouve donc en chaque point de la rivière un couple HVS plus ou moins favorable à l'espèce et son stade de vie. Or dans un contexte soumis aux éclusées à répétitions, le débit variant de façon récurrente, la répartition des zones favorables d'un point de vue des HVS change régulièrement aussi, ce qui force les alevins à se déplacer et augmente le risque d'entraînement et de dérive.

4.2.4 Compartimentation de l'année en périodes biologiques de différentes sensibilités vis-à-vis des éclusées

Afin de mieux cerner les interactions entre éclusées et cycles biologiques de différentes espèces piscicole, l'année civile est habituellement compartimentée en plusieurs « périodes biologiques » en accord avec les caractéristiques des phases biologiques des espèces.

La truite se reproduit à la fin de l'automne, lorsque la température passe sous les 10-11°C. Elle creuse son nid au niveau de zones lotiques dans un substrat de galets et graviers. Les œufs puis alevins restent enfouis dans le substrat jusqu'en avril-mai puis sortent des graviers pour rejoindre la pleine eau en bordure du chenal principal d'abord avant d'être suffisamment développé pour se maintenir dans le courant.



Figure 16 : Reproduction de la truite – géniteurs de la Maronne sur frayère (ECOGEA)



Figure 17 : Alevin de salmonidé (ECOGEA)



Figure 18 : Truitelle de la Maronne (ECOGEA)

Les lithophiles précoces (ombre commun, vandoise, chabot) se reproduisent dès que la température de l'eau atteint les 7-8°C (plutôt 9°C pour la vandoise), au niveau de zones lotiques, en utilisant les galets et graviers comme support.

Les lithophiles printaniers (chevesne, barbeau, goujon) se reproduisent lorsque la température de l'eau atteint les 14-15°C, sur les mêmes sites de frai que les ombres pour ce qui concerne les barbeaux, le chevesne utilisant des habitats plus variés (galets des radiers mais aussi des herbiers rhéophiles) et le goujon des substrats plus fins que les ombres et barbeaux.

Outre le critère de température, les seuils de début de reproduction sont définis selon la photopériode : en l'occurrence décroissante pour la reproduction de la truite (seulement 8h de lumière par jour), et croissante pour la reproduction des autres espèces. Elle doit dépasser 10-12h de lumière par jour pour les reproducteurs précoces au printemps (ombre, vandoise, chabot, ...), puis 16h de lumière par jour pour les espèces se reproduisant plus tardivement au printemps (barbeau, chevesne, goujon, etc.).

Les périodes biologiques sont donc définies ainsi : période 6 (P6), la période de reproduction de la truite de novembre à fin décembre de l'année N-1, la période 1 (P1) d'incubation et de vie intragravellaire des œufs et larves de la truite de janvier à fin février de l'année N ; P2 l'émergence des alevins de truite accompagnée de la reproduction des lithophiles précoces ; P3 la reproduction des lithophiles printaniers. Restent les mois de juillet à octobre que l'on peut scinder en deux périodes, estivale et automnale, respectivement P4 et P5.

Tableau 3 : Découpage des périodes biologiques appliquées à la Cère

Période biologique	Dates	Phases associées
P1	1er janvier 28 février	Incubation des œufs et phase de vie intragravellaire des alevins de truite
P2	1er mars 15 mai	Emergence des alevins de truite, reproduction puis début d'émergence des alevins lithophiles précoces
P3	16 mai 30 juin	Vie en eau libre des alevins de truite et de lithophiles précoces, reproduction des lithophiles printaniers
P4	1er juillet 15 septembre	Vie en eau libre des alevins de l'ensemble du cortège
P5	16 septembre 31 octobre	Période automnale
P6	1er novembre 31 décembre	Reproduction des truites

5. Présentation des jeux de données

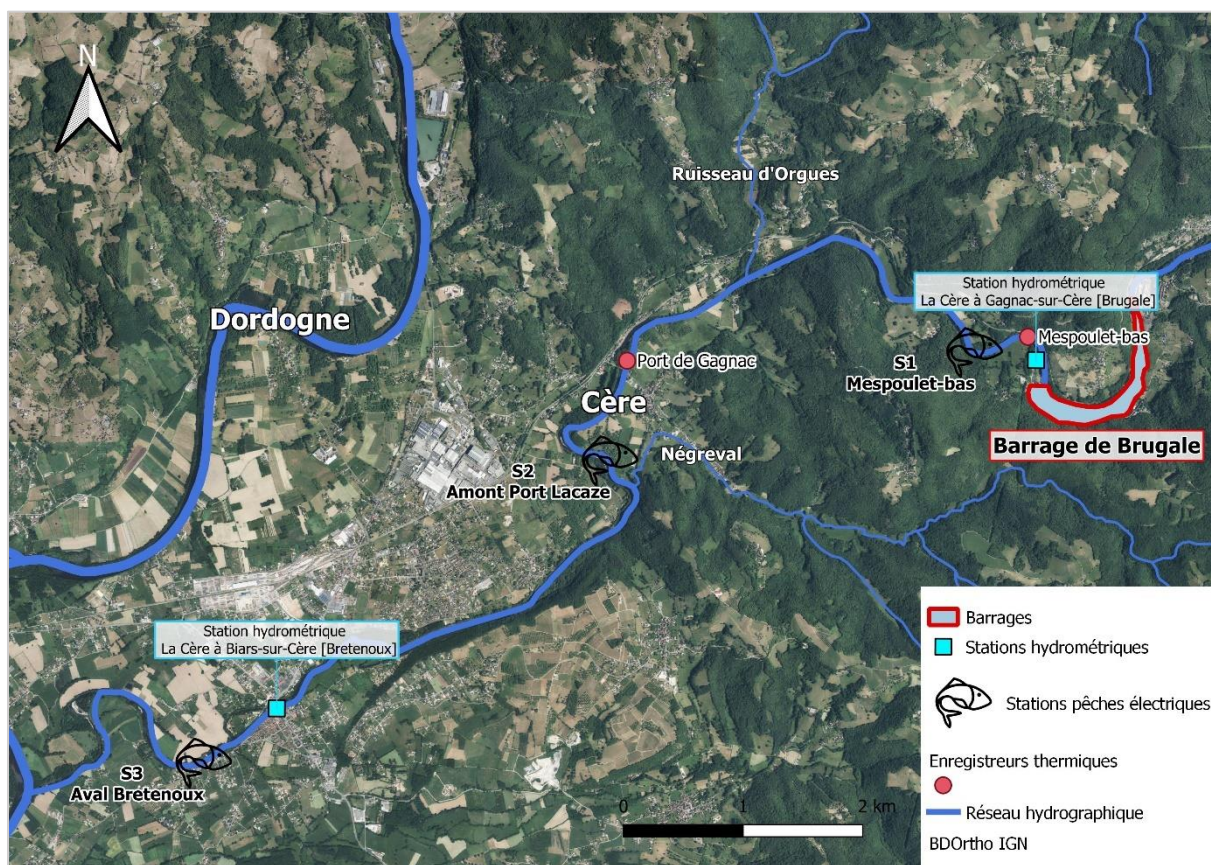


Figure 19 : Localisation des stations de pêche, de mesures de débit et des enregistreurs thermiques sur la Cère aval

5.1 Données piscicoles

La Cère est une rivière relativement grande et large et la prospection par pêche électrique dite « complète » où l'ensemble du chenal est échantillonné est difficile et demande des moyens humains et financiers très importants. De surcroît, l'étude du peuplement piscicole de la Cère aval est à mettre en lien avec la présence de l'aménagement hydroélectrique de Brugale qui affecte principalement les jeunes stades de vie des poissons, qui occupent principalement les parties peu profondes du chenal à l'image des bancs de galets et des radiers. Un protocole de pêche « partielle » à pied, dérivé de celui utilisé par l'OFB depuis 2005 a donc été retenu (Belliard et al., 2012; OFB & INRAE, 2022).

L'échantillonnage par pêche partielle consiste à effectuer des posés d'anode, des points de pêche, ces derniers étant répartis sur la station en tenant compte de la diversité des habitats présents. Chaque point, ou « EPA » pour « échantillonnage ponctuel d'abondance », est décrit en matière d'habitat (situation par rapport à la berge, nature des abris, substrats dominants et marginaux, profondeur et vitesse du courant) ce qui permet de vérifier d'une année sur l'autre que l'on a bien échantillonné les mêmes types d'habitats, ou sinon de pouvoir en tenir compte dans l'analyse de la variabilité des abondances piscicoles (connaître la part de la variabilité l'abondance liée à la prospection d'habitats différents et non aux fluctuations interannuelles des conditions du milieu qui nous intéresse particulièrement ici – variations temporelles de l'hydrologie, de la thermie, des éclusées).

Les EPA doivent être suffisamment éloignés les uns des autres afin de ne pas interférer sur la distribution des poissons et susciter trop de comportements de fuite. En effet, le but est de surprendre les poissons par une approche discrète et un posé d'anode franc et ainsi éviter leur fuite. Les poissons sont capturés à l'aide d'épuisettes puis identifiés et mesurés avant d'être mis dans des bacs de récupération. Tous les poissons sont enfin remis dans leur milieu naturel une fois toutes les manipulations terminées. **Le nombre d'EPA doit être au minimum de 75 par station.** Les densités numériques de poissons sont exprimées en **nombre d'individus pour 100 EPA** (soit 100 posés d'anode).

Dans le cadre de la veille écologique de l'impact des éclusées et compte tenu des objectifs, **une attention particulière est portée à l'échantillonnage des habitats des jeunes stades de vie des poissons** (i.e. le recrutement de l'année), qui est en **lien direct avec l'hydrologie, la thermie et les éclusées de l'année** du fait de leur sensibilité accrue.

Trois stations sur la Cère en aval de Brugale sont pêchées annuellement depuis 2012 : la station 1 « Mespoulet-bas » située à 900 m en aval du barrage, la station 2 « Amont Port Lacaze » approximativement au milieu du tronçon Brugale – confluence Dordogne (à 6 km du barrage) et la station 3 « Aval Bretenoux » à 11 km du barrage et située 2.5 km en amont de la confluence avec la Dordogne.

Dans ce travail, **c'est la station 1 « Mespoulet-bas » qui va nous intéresser.** C'est la plus proche du « signal éclusées », généré au barrage-usine de Brugale, et l'espèce dominante du peuplement piscicole y est la truite.



Figure 20 : Pêche électrique sur la Cère à Mespoulet-bas – 05/09/2022 (ECOGEA)



Figure 21 : Juvénile de truite capturé en pêche électrique (ECOGEA)

5.2 Données hydrologiques

Deux stations hydrométriques sont disponibles sur le secteur d'étude : la Cère à Gagnac-sur-Cère [Brugale] (P194 2910) en aval direct du barrage dudit nom (celle utiliserons dans ce rapport car située juste à l'amont de notre station d'échantillonnage piscicole), et la Cère à Biars-sur-Cère [Bretenoux] (P196 2910) à environ 10 km du barrage.

En parallèle des débits mesurés au droit des stations, les « apports naturels reconstitués » (ANR) seront très utiles. Ils ont été établis par le bureau d'étude Eauce pour EPIDOR, à partir de stations hydrométriques non influencées par des aménagements, situées sur le bassin-versant de la Cère, selon la formule suivante.

$$ANR_{Cère \text{ à } Brugale} = 5.74 * P1834010 [L'Authre \text{ à } Ytrac] + 2.08 * P1712910 [La Cère \text{ à } Vic - sur - Cère]$$

Il s'agit des débits naturels supposés qui transiteraient en aval de Brugale en l'absence de la chaîne d'aménagements hydroélectriques.

5.3 Données thermiques

Deux thermographes sont exploitables sur la Cère en aval de Brugale : un situé à Mespoulet-bas, 450 m en aval du barrage (celui qui nous intéressera plus particulièrement dans ce rapport car situé juste à l'amont de notre station d'échantillonnage piscicole) et un à Port de Gagnac (à 4.7 km du barrage). C'est le thermographe « historique » (données depuis 2000) qui a été utilisé pour reconstituer les données manquantes à Mespoulet-bas sur les douze années du suivi piscicole (2012-2023).

La volonté de ce rapport est d'analyser comment la gestion de l'aménagement hydroélectrique de la Cère influence l'hydrologie, la thermie de la rivière et ainsi détermine le recrutement en truitelles en fin d'été dans le secteur salmonicole de Mespoulet-bas.

6. Influence des aménagements sur l'hydrologie

6.1 Données de synthèse de l'hydrologie influencée

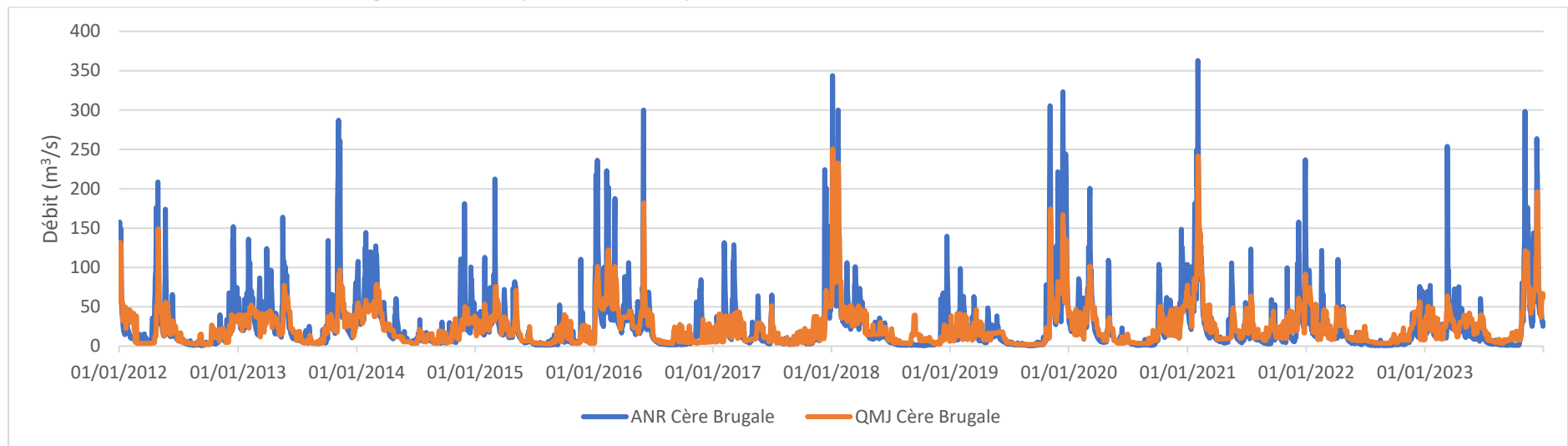
Les données hydrologiques de la Cère sont disponibles **depuis 1994** à la station de Brugale, soit **bien après l'édification** de tous les ouvrages hydroélectriques sur le bassin (les derniers datant de 1967). C'est pourquoi on parle d'« hydrologie influencée », influence imputée principalement à la retenue de St-Etienne-Cantalès et sa capacité de stockage de 133.5 millions de m³.

Tableau 4 : Synthèse des données hydrologiques de la Cère aux stations hydrométriques de Brugale

	[Brugale]	Unité
C5	208	m ³ /s
C2	136	m ³ /s
Module	23.9	m ³ /s
Qsp	24.8	l.s ⁻¹ .km ⁻²
QMNA2	4.1	m ³ /s
	17.2	% du module
QMNA5	3.2	m ³ /s
	13.3	% du module

La Cère est une rivière abondante avec un débit spécifique élevé. La disponibilité en eau à l'étiage est bonne pour un cours d'eau du Massif Central (QMNA5 supérieur au dixième du module, QMNA2 à 17% du module). La crue fréquente est de 5,7 fois le module.

6.2 Influence des aménagements hydroélectriques sur les crues



Sur la figure ci-dessus, on constate que de manière générale, la chaîne d'aménagements hydroélectriques induit une atténuation des pics de crue à l'aval de Brugale, avec un écart moyen sur le $Q_{\max}$ annuel de $114 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui est considérable et à mettre en lien avec la capacité utile très importante de la retenue de St-Etienne-Cantalès. Toutefois, il convient de relativiser cette valeur du fait de l'incertitude sur les valeurs reconstituées.

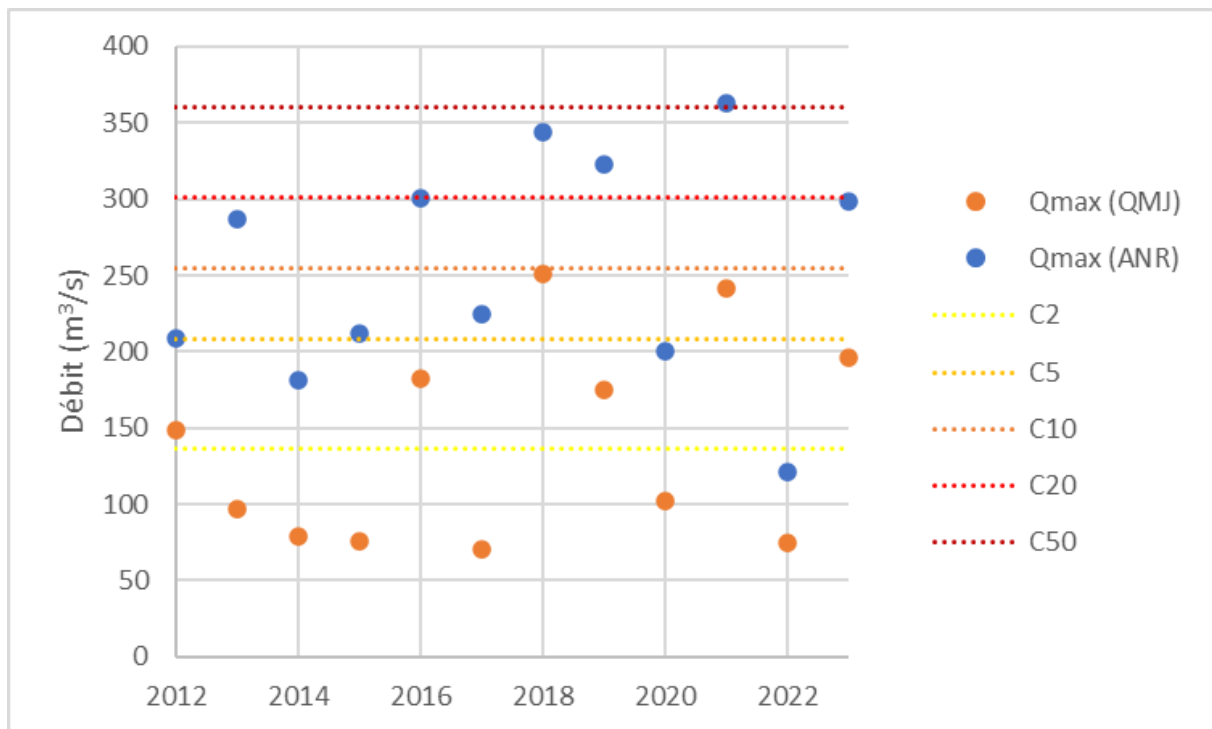


Figure 23 : Comparaison des débits maximaux en situation actuelle (orange) et en situation naturelle reconstituée (bleu)

Il est intéressant de noter que les crues disparaissent complètement certaines années : en 2013 par exemple, nous aurions dû avoir une crue décennale alors qu'aucun coup d'eau dépassant la crue biennale ne s'est produit. La réduction du pic de crue se voit aussi lors des années à hydrologie hivernale intense comme en 2018, où la crue quinquennale (en hydrologie influencée) laisserait place à une crue encore plus importante en situation naturelle.

6.3 Influence des aménagements hydroélectriques sur les bas débits

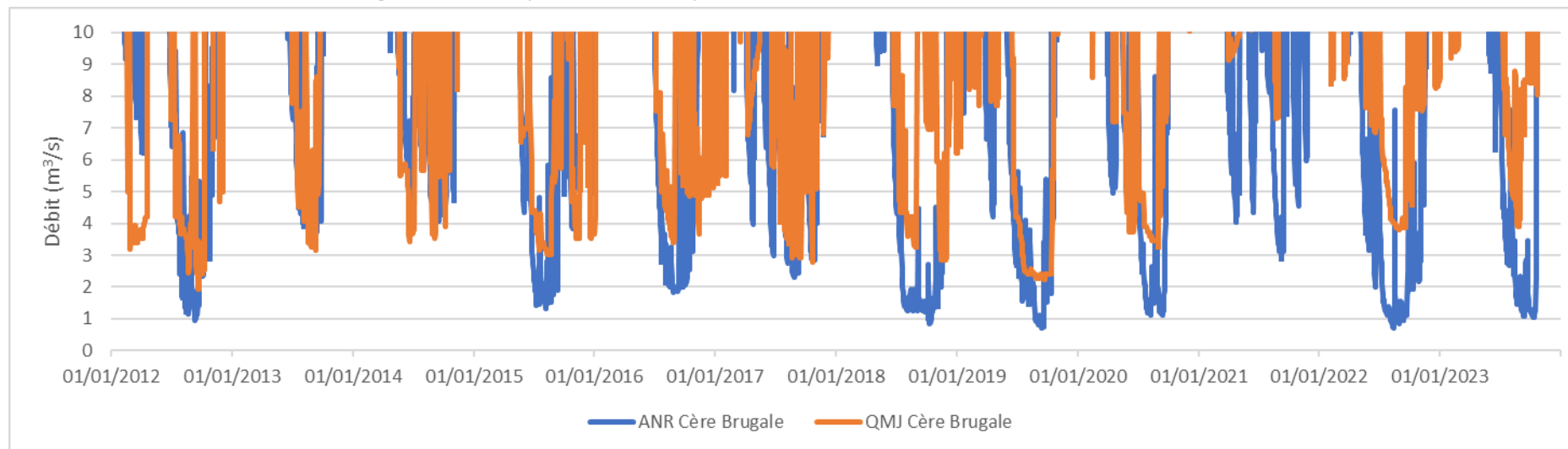


Figure 24 : Comparaison de l'hydrogramme de la Cère à Brugale avec celui des ANR - zoom sur les débits inférieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$

En ce qui concerne les basses eaux, les débits d'étiages observés à l'aval de Brugale sont globalement supérieurs aux ANR. Cela s'explique par la législation qui impose depuis 2014 un débit réservé au dixième du module (en l'occurrence $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le barrage de Brugale) : plutôt que de perdre cette eau, EDF préfère modifier un groupe pour turbiner autour de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, augmentant ainsi le débit d'étiage en comparaison à ce qu'on aurait naturellement (Figure 25).

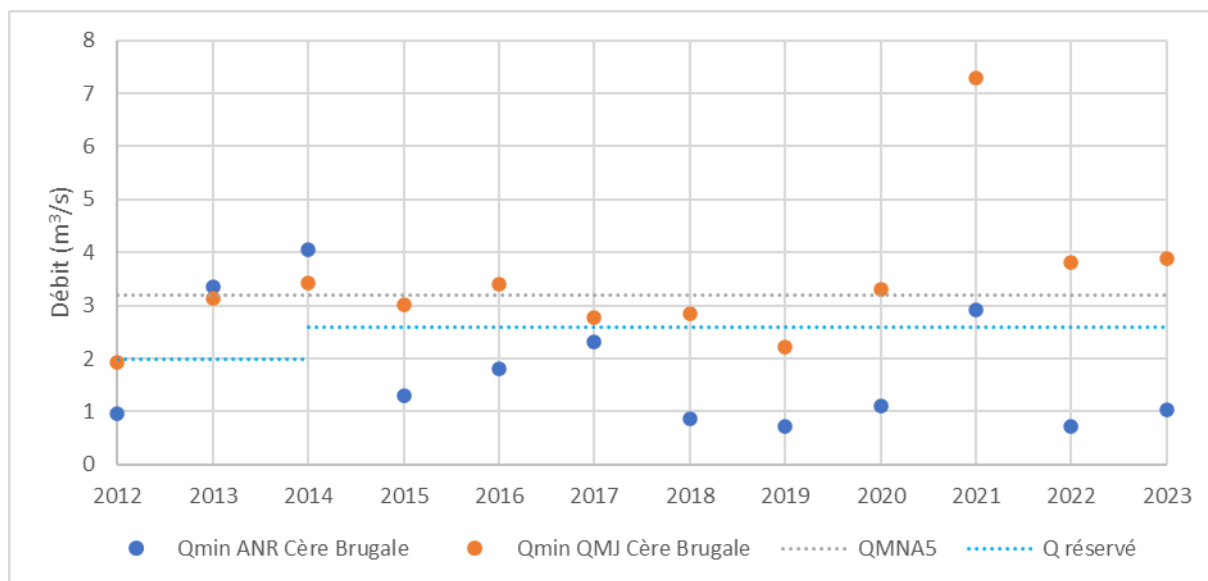


Figure 25 : Comparaison des débits minimaux en situation réelle et naturelle

L'écart moyen du Qmin annuel vaut $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$ de moins en situation naturelle, ce qui encore une fois est important (53% du QMNA5), mais à relativiser du fait des incertitudes sur le modèle.

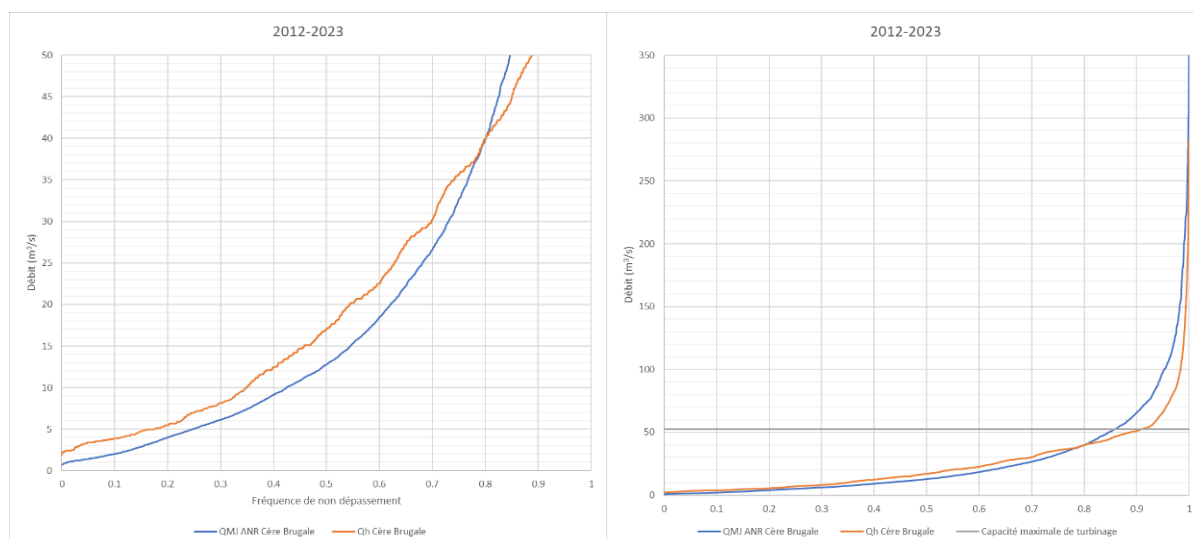


Figure 26 : Courbes des débits classés en situation naturelle (ANR) VS en régime influencé (en orange) : dans la gamme de turbinage (à gauche) – dans la gamme de débit totale (à droite)

Au global, on constate que l'aménagement de Brugale optimise bien son exploitation hydroélectrique en allongeant la durée des débits passée dans sa gamme de turbinage ($52.5 - 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$), avec 87% du temps contre 69% en ANR. En ANR, l'hydrologie de la Cère passe plus de temps en dessous de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ et au-dessus de $52.5 \text{ m}^3/\text{s}$ qu'en hydrologie influencée au droit de Brugale.

6.4 Le régime d'éclusées

6.4.1 Présentation de l'indicateur éclusées (Courret, 2014)

L'enjeu de l'étude de l'impact des éclusées sur l'ichtyofaune est de différencier l'influence des variations naturelles de débit, que sont les crues par exemple, de celle des variations induites par l'exploitation des ouvrages hydroélectriques.

Un outil a été développé par D. Courret dans le cadre d'une thèse : l'indicateur éclusées (Courret, 2014). Cet indicateur permet de caractériser le régime d'éclusées en détectant les variations non naturelles de débit pour, in fine, déterminer un niveau de perturbation hydrologique. En outre, cet outil permet d'isoler les caractéristiques fines d'une variation non naturelle de débit, aussi bien à la hausse qu'à la baisse, puis de générer des métriques de synthèse caractérisant le régime d'éclusées (ECOGEA, 2024).

Une éclusée se caractérise par :

- Un débit de base (m^3/s) qui correspond au débit de départ avant la hausse ou au débit lorsque la baisse se termine,
- Un débit de pointe (m^3/s) qui correspond au débit maximal atteint lors de l'éclusée en question,
- Une amplitude (m^3/s) égale à la différence du débit de pointe par le débit de base,
- Un ratio égal au débit de pointe divisé par le débit de base,
- Un gradient (de baisse ou de hausse exprimé généralement en $[\text{m}^3/\text{s}]/\text{h}$) qui correspond à l'amplitude divisée par la durée de variation du débit.

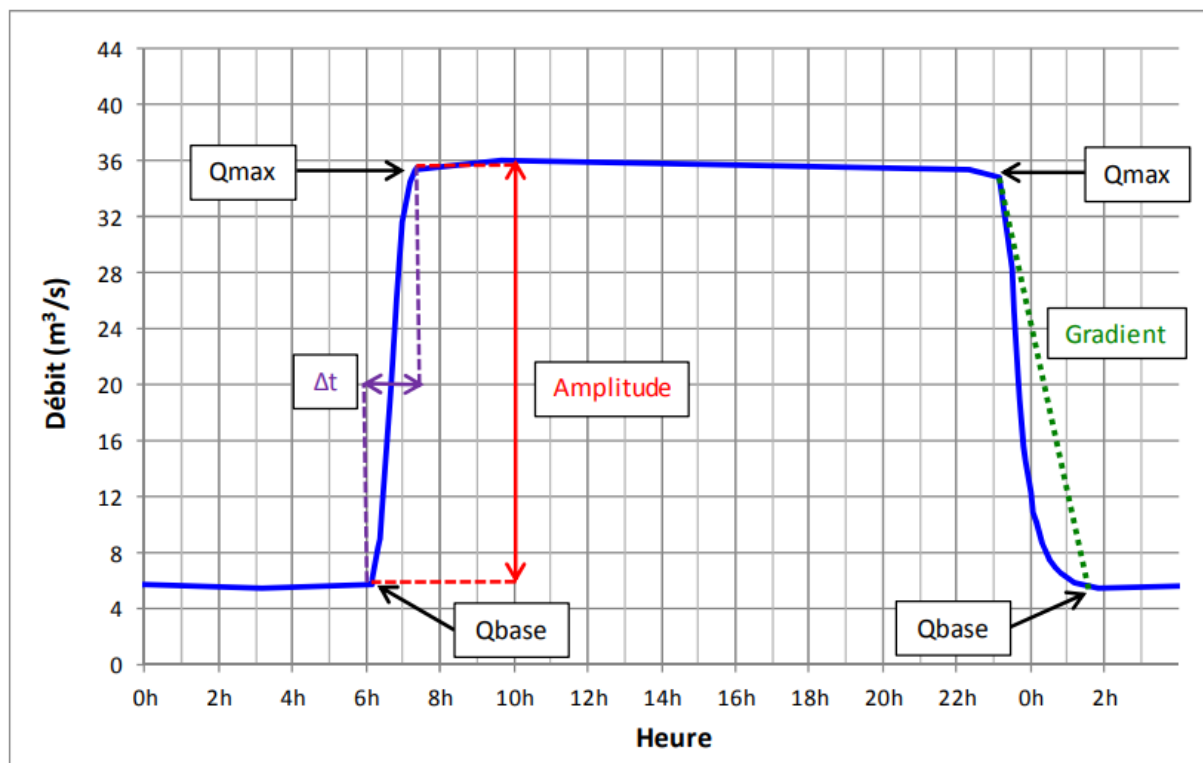


Figure 27 : Variables caractéristiques d'une hausse ou baisse d'éclusée. Ici l'éclusée schématisée est symétrique ce qui n'est pas forcément le cas (Courret, 2014)

Le régime d'éclusées est quant à lui caractérisé par :

- Le nombre de hausses et de baisses d'éclusées,
- Les caractéristiques de chacune des hausses et baisses, énoncées précédemment,
- La saisonnalité (Baran, 2023).

A partir d'un hydrogramme, l'outil extrait un certain nombre de métriques qui reposent sur les caractéristiques des hausses et baisses d'éclusées, principalement des fréquences de non dépassement. Par exemple « Hampli50 » pour l'amplitude d'une hausse d'éclusée non dépassée 50% du temps (donc l'amplitude médiane des hausses).

L'indicateur éclusées permet in fine d'attribuer une classe de perturbation hydrologique variant de 0 à 5 au régime d'éclusées détecté sur un hydrogramme.

Tableau 5 : Qualification du niveau de perturbation hydrologique associée à chaque classe (Courret, 2014)

Classe	Code couleur	Niveau de perturbation hydrologique due aux éclusées
0		Hydrologie naturelle ou peu perturbée
1	Bleu	Perturbation hydrologique sensible.
2	Vert	Perturbation hydrologique marquée.
3	Jaune	Perturbation hydrologique très marquée.
4	Orange	Perturbation hydrologique sévère.
5	Rouge	Perturbation hydrologique très sévère.

Un schéma de synthèse de la démarche de calcul de l'indicateur éclusées est disponible en annexe (12.1).

6.4.2 Résultats de l'indicateur éclusées sur l'hydrologie de la Cère à Brugale

Tableau 6 : Résultats de l'indicateur éclusées à Brugale pour les douze années de la chronique

2012	2013	2014	2015	2016	2017
5	4+	4-	5	4+	5
2018	2019	2020	2021	2022	2023
5	5	4-	4+	4-	4-

A l'échelle annuelle, la Cère est un cours sévèrement voire très sévèrement perturbé sur le plan hydrologique du fait des éclusées de l'aménagement de Brugale.

Tableau 7 : Résultats de l'indicateur éclusées à Brugale *par période biologique* sur la chronique d'étude

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
2012	3+	1	1	1	4-	4-
2013	3-	3+	1	1	4-	3+
2014	3-	1	1	2-	3-	3+
2015	4-	3-	1	1	4-	4-
2016	0	2-	2+	2+	4-	4-
2017	5	3+	1	2-	4-	5
2018	2-	3+	1	2+	2+	4-
2019	4+	3-	1	0	2+	2+
2020	3+	2-	1	1	4-	4-
2021	3-	3+	1	3-	4-	4-
2022	4-	4-	1	0	2-	3+
2023	4+	3+	1	1	/	/

La variabilité de la perturbation hydrologique est en revanche très hétérogène à l'échelle infra-annuelle. Les périodes de début (P1 : vie sous graviers des œufs et larves de salmonidés) et fin d'année (P6 : reproduction des salmonidés), où la ressource en eau est la plus abondante (régime pluvial) et la demande en énergie la plus forte du fait des basses températures, font face à une activité hydroélectrique plus intense et à une perturbation hydrologique sévère.

La deuxième partie du printemps (P3) ainsi que l'été (P4) sont nettement moins perturbés hydrologiquement (moins de ressources et moins de besoins), même si le régime hydrologique n'est pas « naturel ».

A souligner que la période P5, qui correspond pourtant à la période septembre-octobre (débits généralement encore faibles et températures de l'air chaudes à douces), est tout aussi perturbée que la P6 et même plus que la P1. Finalement, il y aurait donc une décorrélation entre hydraulité et intensité de l'activité hydroélectrique. Effectivement, quand on rentre dans le détail de toutes les périodes entre 2012 et 2023 ayant subi beaucoup d'éclusées (>100), elles présentent en moyenne une hydrologie légèrement déficitaire (0.86 – moyenne du rapport entre le débit moyen de la période et le débit moyen interannuel de cette même période). Cela peut s'expliquer par les choix en matière de gestion de la part d'EDF qui peut tout à fait décider de mobiliser en priorité une chaîne hydroélectrique plutôt qu'une autre (au printemps par exemple) et ainsi stocker sur l'autre pour turbiner plus tard (à l'automne).

7. Influence des aménagements hydroélectriques sur la thermie

7.1 Synthèse des données thermiques

Tableau 8 : Températures moyennes journalières minimales, moyennes et maximales rencontrées chaque mois de la chronique – thermographe de **Mespoulet-bas**

	2012			2013			2014			2015			2016			2017			2018			2019			2020			2021			2022			2023			Moyenne mensuelle
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max				
janv	5.7	6.7	7.8	5.0	6.2	7.5	6.3	6.9	7.4	5.2	6.3	7.4	6.2	7.2	8.5	4.2	5.2	6.3	6.8	7.6	8.5	5.4	5.9	6.4	6.1	7.0	7.6	4.9	5.7	6.8	4.5	5.9	7.4	5.0	7.3	9.0	6.5
févr	3.5	4.3	5.5	4.1	5.3	6.5	6.2	6.8	7.2	4.4	5.2	6.0	6.3	7.1	7.6	5.3	6.2	7.0	5.0	6.3	7.7	5.1	6.0	6.7	6.8	7.6	9.0	6.9	7.5	8.5	5.1	6.3	8.5	4.6	5.5	6.9	6.2
mars	4.8	6.1	8.1	5.0	6.3	7.5	6.4	7.4	8.2	5.8	6.8	8.1	6.2	7.1	8.2	6.4	7.8	9.2	5.7	6.9	8.0	6.4	7.5	8.4	7.4	8.0	8.7	7.4	8.0	9.5	6.0	7.9	9.6	4.8	7.1	8.8	7.2
avr	7.2	7.7	8.2	6.6	8.2	9.8	8.3	9.4	10.3	7.4	9.6	11.5	7.4	8.6	9.6	8.7	10.2	11.4	7.4	9.5	11.7	7.3	9.7	11.7	8.3	11.0	13.4	9.1	10.2	11.6	6.3	8.8	11.1	8.8	9.8	11.5	9.4
mai	8.4	9.9	11.4	8.9	10.1	11.4	10.3	11.7	13.3	9.1	11.5	13.5	9.0	10.8	11.7	10.2	11.6	13.6	10.1	12.0	13.8	9.9	10.8	11.6	10.1	12.4	16.0	9.2	11.3	13.4	10.9	14.0	17.2	10.0	11.5	13.2	11.5
juin	11.3	12.4	14.7	10.5	12.5	14.1	13.6	15.9	17.5	12.5	15.3	18.3	11.2	13.2	14.6	11.5	15.2	18.8	12.1	13.8	16.8	10.6	13.7	20.8	13.3	15.2	17.0	12.2	14.0	17.3	13.5	16.3	19.3	13.4	14.3	15.5	14.3
juil	13.4	15.0	16.6	13.8	16.5	19.5	12.7	14.8	16.9	17.0	19.2	20.4	15.0	17.1	18.4	11.5	15.0	17.7	15.2	17.6	19.2	17.6	20.1	21.5	14.8	17.7	20.5	12.0	13.7	15.5	12.5	17.5	20.1	13.1	17.2	19.0	16.8
août	15.4	16.7	17.7	15.0	16.0	17.5	13.1	14.2	15.8	16.3	17.7	20.1	16.5	17.5	18.3	14.9	16.8	18.9	16.9	18.4	20.2	16.9	18.0	19.8	16.9	19.1	20.8	14.3	16.1	17.6	17.2	18.5	19.7	16.5	18.0	20.1	17.2
sept	13.6	15.4	17.0	12.5	13.9	15.7	14.0	14.9	16.0	12.5	13.5	16.6	13.7	14.4	17.1	12.7	14.1	16.6	12.4	14.2	16.8	13.7	15.7	18.4	11.8	14.7	16.5	15.0	15.8	16.9	11.3	15.0	18.3	16.9	17.3	17.5	14.9
oct	11.8	13.5	14.8	12.3	13.5	14.2	14.0	14.8	15.4	12.1	13.5	14.5	12.0	13.2	14.6	12.2	13.8	14.6	12.1	14.0	15.6	11.2	13.1	14.9	11.6	12.2	12.9	13.1	14.0	15.1	11.1	12.1	13.1	/			13.4
nov	9.5	11.3	13.0	7.2	10.3	12.6	10.5	12.1	14.8	8.6	10.9	12.7	8.7	10.5	12.1	8.0	10.8	12.6	8.1	10.8	12.6	9.2	10.4	12.4	8.7	10.7	12.0	8.9	11.2	14.2	10.1	11.2	12.1	/			10.9
déc	6.9	7.6	8.7	6.3	6.8	7.3	6.3	8.7	10.7	6.8	7.8	9.4	6.0	7.4	8.6	6.0	7.1	8.8	6.5	9.0	10.7	7.1	8.7	9.6	6.8	8.0	9.3	6.0	7.3	9.1	6.5	8.9	10.5	/			7.9
Moyenne annuelle	10.5			10.5			11.5			11.4			11.2			11.1			11.7			11.6			12.0			11.2			11.9			/			

On constate dans le tableau ci-dessus que la période froide s'étend de décembre à mars avec des températures moyennes toujours supérieures à 4°C et des minimales en instantané ne descendant pas en dessous de 3.5°C. C'est en 2012 que l'hiver fut le plus rigoureux. De manière générale, les températures restent relativement douces par rapport à d'autres cours d'eau qui peuvent friser les 0°C et sur lesquels la survie des œufs peut être compromise par les pics de froid. Cette « douceur » s'explique par la stratification thermique des retenues (St-Etienne-Cantalès alimente la Cère en eau provenant du fond de la retenue. Or en hiver, l'eau qui se trouve dans les couches inférieures de la retenue est à 4 °C qui est le point de densité maximale de l'eau). Cela agit comme un tampon face à la baisse des températures d'eau l'hiver.

La période chaude correspond aux mois de juillet-août, ce dernier étant le plus chaud d'après les moyennes mensuelles interannuelles. L'été le plus chaud s'est produit en 2019 avec notamment une température moyenne au-delà des 20°C au mois de juillet, ce qui montre un net contraste avec les 13.7°C de moyenne observés en 2021, année bien plus froide.

Tableau 9 : Températures moyennes maximales sur trente et sept jours consécutifs à Mespoulet-bas – tolérance du stade « juvénile » à gauche et « adulte » à droite – Vert : dans l'optimum thermique ; jaune : écart inférieur à 1 degré en dehors de l'optimum thermique ; orange : écart supérieur à 1 degré en dehors de l'optimum thermique (adapté du « projet TIGRE » de INRAE - Université de Tours - OFB)

Année	T30Jmax	T7Jmax	Année	T30Jmax	T7Jmax
2012	16.6	17.4	2012	16.6	17.4
2013	17.1	18.7	2013	17.1	18.7
2014	16.6	17.4	2014	16.6	17.4
2015	19.3	20.3	2015	19.3	20.3
2016	17.7	18.1	2016	17.7	18.1
2017	16.8	18.0	2017	16.8	18.0
2018	18.8	20.0	2018	18.8	20.0
2019	20.3	20.9	2019	20.3	20.9
2020	19.5	20.2	2020	19.5	20.2
2021	16.4	17.1	2021	16.4	17.1
2022	19.0	19.5	2022	19.0	19.5
2023	18.2	19.1	2023	18.2	19.1
Moyenne	18.0	18.9	Moyenne	18.0	18.9

Opt. min.	4
Opt. max.	17
Mortal.	25

Opt. min.	4
Opt. max.	19
Mortal.	25

La température moyenne maximale sur trente jours consécutifs, qui reflète la thermie globale estivale, montre que **la station de Mespoulet-bas est déjà limitante s'agissant des températures pour les juvéniles de truite**, avec huit années sur douze subissant des températures supérieures à l'optimum maximal. A contrario, la station reste plutôt favorable aux adultes (avec les 3/4 des années en vert sur trente jours, et la moitié sur sept) qui supportent mieux les fortes chaleurs que les juvéniles.

7.2 Catégorie de cours d'eau

7.2.1 Typologie de Verneaux

A partir des données de températures d'eau, entre autres, on peut déterminer le niveau typologique théorique (NTT) d'un tronçon de cours d'eau. En effet, la thermie est un paramètre essentiel qui gouverne la biologie et la physiologie des poissons (métabolisme, coût énergétique, niveau de stress, etc.) (Arevalo et al., 2021), mais aussi leur distribution le long du continuum fluvial (Ferguson, 1958). Développé dans le cadre d'une thèse de J. Verneaux, le NTT permet de compartimenter le continuum fluvial en différents biocénotypes dont chacun est associé à un cortège piscicole théorique et à des indices d'abondance théorique par espèce.

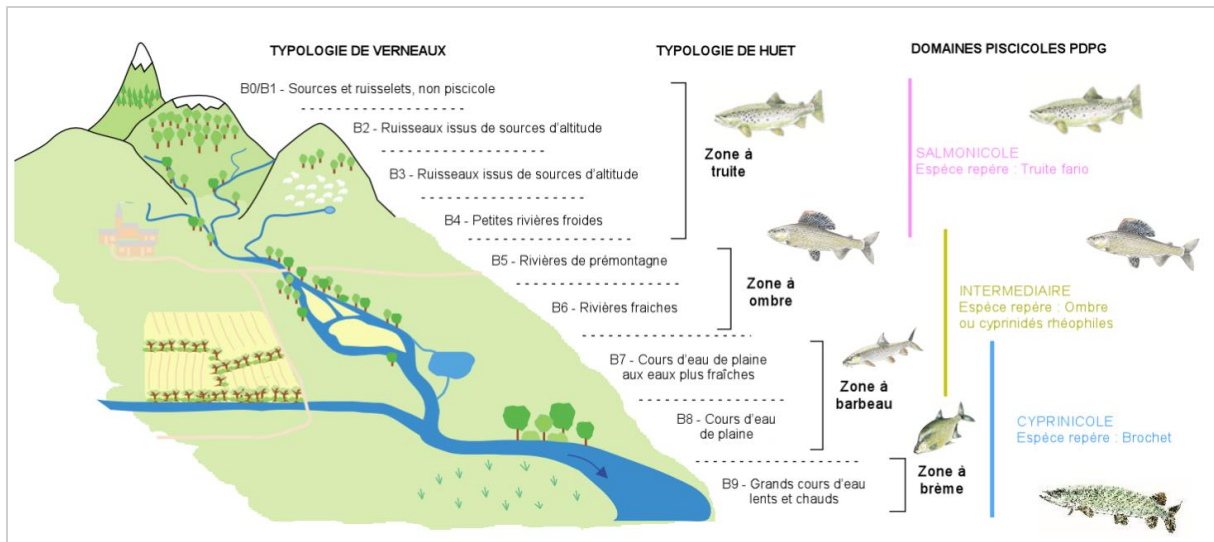


Figure 28 : Succession des niveaux typologiques de Verneaux par rapport à la zonation de Huet et des domaines piscicoles (Fédération du Tarn pour la Pêche & et la Protection du Milieu Aquatique, 2020)

$$T_{th} = 0,45 T_1 + 0,30 T_2 + 0,25 T_3$$

où :

$$T_1 = 0,55 \theta_{max} - 4,34$$

$$T_2 = 1,17 [\ln (d_0 \cdot D/100)] + 1,50$$

$$T_3 = 1,75 [\ln (S_m / (p \cdot l^2) \times 100)] + 3,92$$

Figure 29 : Equation du calcul du niveau typologique théorique de Verneaux (Degiorgi & Raymond, 2000)

- θ_{max} : moyenne des températures maximales hebdomadaires du mois le plus chaud (et non la température moyenne des trente jours consécutifs les plus chauds comme souvent utilisé),
- d_0 : distance à la source en km,
- D : dureté calco-magnésienne en mg/L,
- S_m : section mouillée à l'étiage en m^2 ,
- P : pente du lit en ‰,
- l : largeur du lit mineur en m.

Tableau 10 : Résultats des NTT par station de pêche (calcul effectué chaque année puis moyenné sur la série chronologique)

	S1	S2	S3
Min	4.1	4.5	4.7
Moyenne	4.5	5.1	5.2
Max	5.0	5.6	5.8

On constate que, d'une part, la station S1 est plutôt salmonicole (zone à truite inférieure), et d'autre part, que les stations S2 et S3 correspondent au début de la zone à ombre, à savoir des contextes intermédiaires avec encore de la truite mais aussi des cyprinidés rhéophiles en plus grande densité.

Tableau 11 : Espèces théoriquement présentes sur la Cère à la station de Brugale – classes d'abondance d'après le NTT moyen (d'après les travaux de Verneaux complétés par Degiorgi et Raymond 2000 ; les classes d'abondance sont croissantes)

de 0 à 5 ; elles doivent être vues comme le reflet de la distribution des espèces le long du linéaire d'un cours d'eau. 0, l'espèce est absente de la typologie, 5, elle est à son abondance maximale dans cette typologie. (11.2)

Nom vernaculaire	Nom latin	Classe d'abondance
Chabot	Cottus gobio	3
Truite	Salmo trutta fario	4
Vairon	Phoxinus phoxinus	4
Loche franche	Barbatula barbatula	5
Goujon	Gobio gobio	2
Anguille	Anguilla anguilla	1

Sur la station de pêche de Mespoulet Bas, située à l'aval proche du barrage de Brugale, on devrait donc échantillonner essentiellement de la loche, de la truite, du vairon et du chabot.

7.2.2 Zonation de Huet (règle des pentes)

26 ans avant la typologie de Verneaux, Huet a produit un abaque permettant de compartimenter le continuum fluvial en quatre grands domaines piscicoles selon la pente et la largeur du cours d'eau : la zone à truite (la plus apicale), puis successivement les zones à ombre, à barbeau et enfin à brème qui correspond à la partie aval lentique des grands cours d'eau.

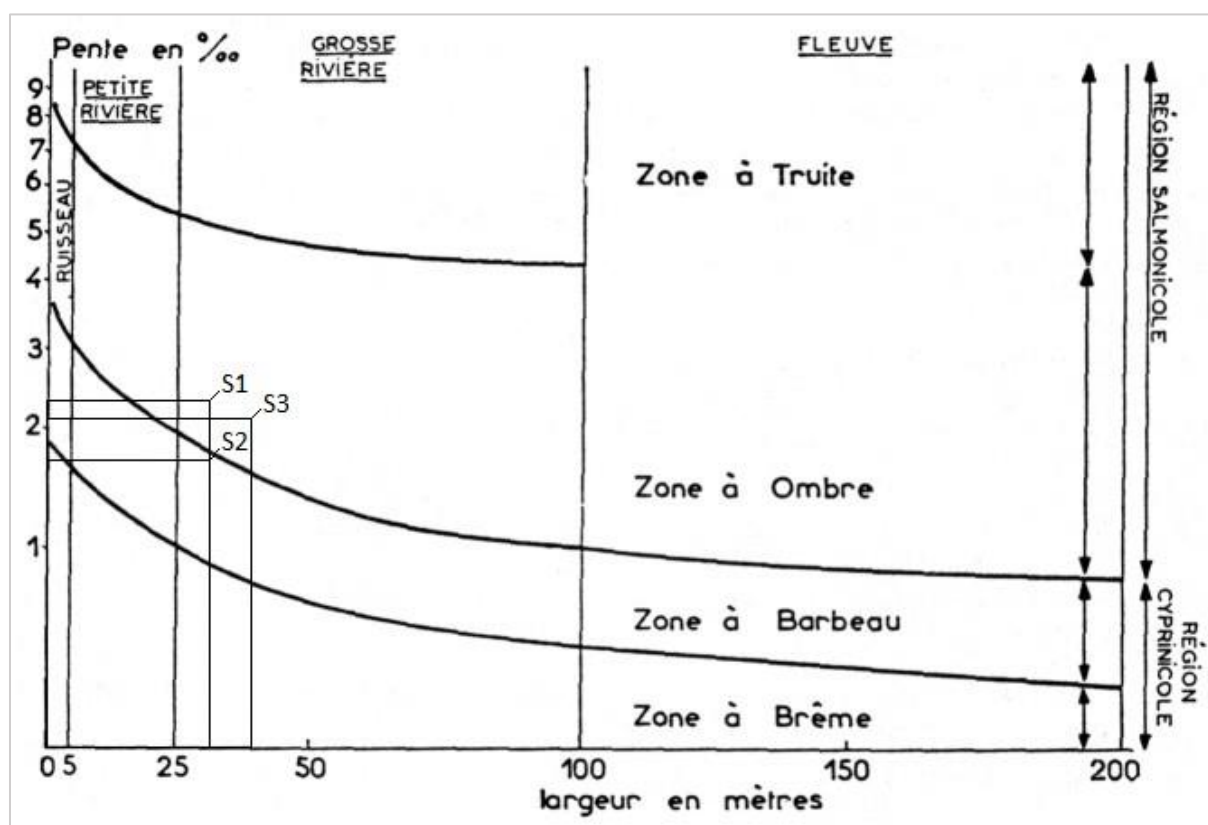


Figure 30 : Abaque de la règle des pentes de Huet (1947) et position des trois stations par rapport aux courbes

Selon la pente et les largeurs de chacune des stations, la station 1 en aval du barrage de Brugale se situe dans la zone à ombre inférieure et non dans la fin de zone à truite comme l'indiquent les NTT. La station 2 bascule en tout début de zone à barbeau alors que les NTT indiquent le début de la zone à ombre. La station 3 correspond de nouveau à la zone à ombre inférieure, là où les NTT indiquaient la zone à ombre supérieure.

7.2.3 Discussion

La zonation de Huet ne prend en compte que deux paramètres morphologiques des rivières très globaux : la pente et la largeur. Sur ces deux paramètres, les aménagements hydroélectriques ont une influence réduite à court terme (ce n'est pas exact pour le moyen et long terme). Si, en plus de la morphologie, on introduit la thermie (typologie de Verneaux), on détecte un hiatus. La Cère en aval de Brugale a une « morphologie » de zone à ombre inférieure alors que la typologie théorique, en introduisant le paramètre thermique, indique une zone à truite inférieure, donc un peuplement de rivière plus fraîche.

Cette comparaison est éclairante quant à l'effet des aménagements hydroélectriques sur la thermie de la Cère. En effet, le barrage de St-Etienne-Cantalès, de par sa capacité et sa profondeur semble induire un refroidissement du régime thermique de la Cère au moins jusqu'à Port de Gagnac. Et la Cère en aval de Brugale, bien qu'ayant une « morphologie » de rivière à ombre, se retrouve avec une température plus favorable aux truites.

Ce hiatus se résorbe en allant vers l'aval et la confluence avec la Dordogne (éloignement de la chaîne hydroélectrique). En aval de Bretenoux, la Cère apparaît comme une rivière à ombre d'après Huet, comme d'après Verneaux.

De manière globale, sous l'effet du réchauffement climatique et l'augmentation inhérente des températures d'eau, un glissement typologique est en cours sur les rivières, vers des cortèges de plus en plus thermotolérants et à grande plasticité écologique (O'Briain, 2019). Dans le cas des cours d'eau situés en aval de grandes retenues restituant de l'eau froide issue des couches profondes, le glissement typologique est plus long à se manifester du fait de l'effet tampon que produisent ces aménagements. Pour autant, ce phénomène est certainement en cours sur la Cère comme le montre la figure ci-dessous à la station de Mespoulet-bas : dans la dernière décennie, la température moyenne mensuelle du mois d'août a augmenté d'environ un degré. De plus, le second thermographe disponible (Port de Gagnac, qui enregistre la thermie depuis l'an 2000) fait état d'une tendance significative d'après le test de Mann-Kendall saisonnier (seuil de signification 1%, p-value <0.0001) dont le tau de Kendall (0.07, compris entre -1 et 1) traduit une tendance positive faible au réchauffement.

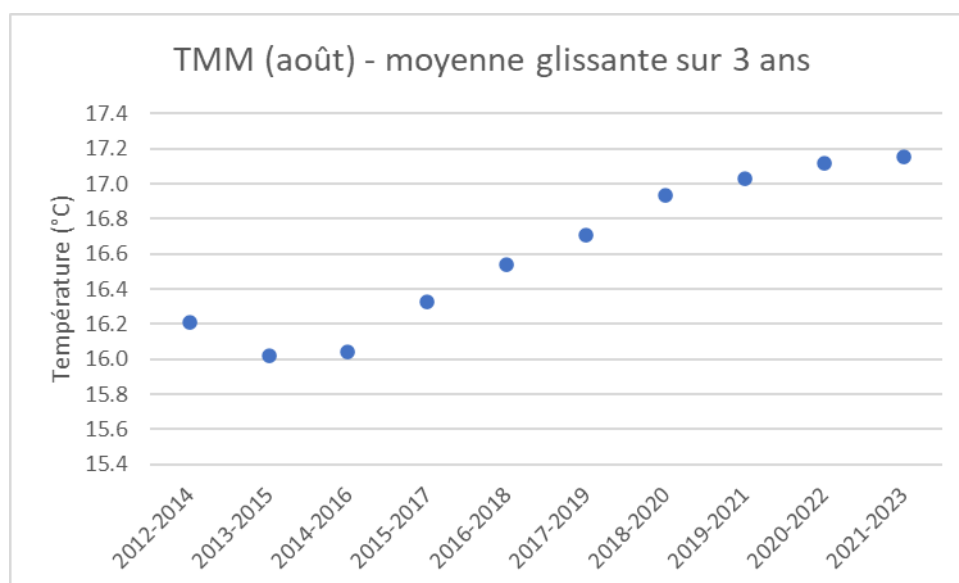


Figure 31 : Moyenne glissante sur 3 ans de la température moyenne du mois d'août à Mespoulet-bas

8. Influence des aménagements sur le recrutement en truites

8.1 Présentation globale du peuplement à Mespoulet-bas

Tableau 12 : Liste des espèces pêchées à Mespoulet-bas entre 2012 et 2023, fréquences de capture et abondances moyennes (ind/100 EPA) – codes espèces en annexe 12.4

S1								
ANG	91.7%	6.0	EPI	50.0%	3.1	PES	16.7%	0.3
BAF	50.0%	3.3	GAR	16.7%	0.6	SAN	8.3%	0.1
BRB	8.3%	0.9	GOU	100.0%	142.4	SAT	75.0%	3.3
BRG	25.0%	1.0	GRE	16.7%	0.2	TAN	8.3%	0.1
CCO	8.3%	2.7	LOF	100.0%	26.4	TRF	100.0%	103.8
CHA	100.0%	55.9	LPP	16.7%	0.7	VAI	91.7%	363.8
CHE	41.7%	1.9	PER	16.7%	0.7	VAR	8.3%	0.1

La richesse spécifique est déjà assez élevée pour de la zone à truite avec dix espèces contactées en moyenne et 21 espèces différentes rencontrées sur l'ensemble de la chronique. On note la présence de la truite et de ses espèces d'accompagnement (chabot, loche franche et vairon) en plus du goujon et de l'anguille, ainsi que d'autres espèces contactées de façon plus épisodique (chevesne et barbeau par exemple). Il s'agit des espèces dominantes aussi bien en termes de fréquence de capture que d'effectifs (mis à part l'anguille, très souvent rencontrée mais en faible abondance).

On note l'influence de la présence du barrage de Brugale juste à l'amont avec la présence sporadique d'espèces non inféodées à ce type de cours d'eau. Il s'agit d'espèces peuplant la retenue dont certains individus peuvent dévaler lors des épisodes de surverse et se retrouver à Mespoulet-bas (gardon, perche soleil, sandre, etc.).

Mis à part la présence sporadique d'espèces non conformes à ce type de milieu, le peuplement reste cohérent avec le biotype de la Cère à Mespoulet-bas.

8.2 Variabilité interannuelle du recrutement en truites

Avant de s'intéresser au détail des années, il est intéressant de regarder la variabilité interannuelle des abondances en truitelles afin de replacer chaque valeur dans son contexte : les X alevins capturés une année Y correspondent-ils à une bonne ou à une mauvaise année en matière de recrutement ?

Pour ce faire, une discrétisation des abondances en alevins peut être faite sur la base de statistiques descriptives. Compte tenu du nombre d'années, trois classes d'abondances sont choisies : la classe « mauvais » pour les valeurs inférieures au 1^{er} quartile, la classe « bonne » pour celles supérieures au 3^{ème} quartile et la classe « moyenne » pour celles comprises entre ces deux bornes.

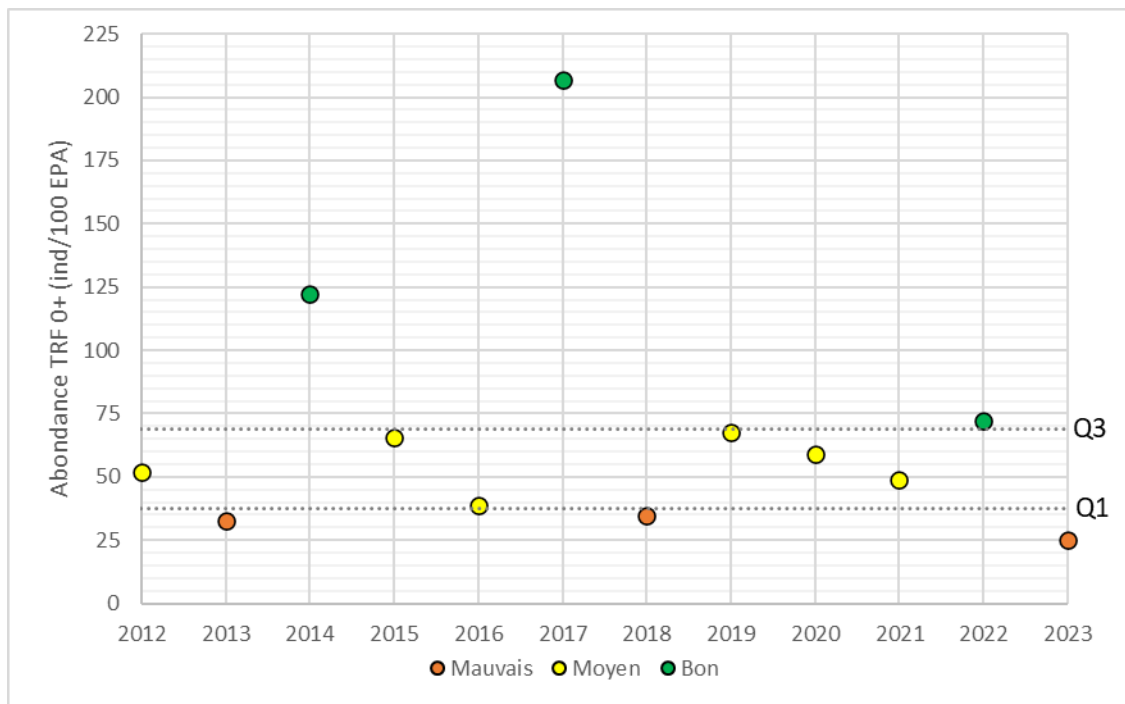


Figure 32 : Discretisation des classes d'abondance en juvéniles de truite sur la station 1 « Mespoulet-bas »

L'abondance en truitelles varie de 25 à 207 individus pour 100 EPA, la moyenne est de 69 (portée par les deux valeurs supérieures qui sortent du lot) tandis que la médiane est de 56 individus pour 100 EPA.

On constate que, dans les faits, il n'y a pas vraiment de mauvaise année (mis à part peut-être 2023 qui se distingue un peu plus par le bas), surtout si l'on compare à d'autres stations du bassin de la Dordogne suivies par ECOGEA. En effet, on a en moyenne un alevin de truite tous les deux posés d'anode. A l'inverse, deux années se distinguent nettement par leur niveau de recrutement, 2014 et surtout 2017 qui constitue une année exceptionnelle. Cet état de fait de forte productivité en alevins de truite est remarquable et pour le moins étonnant quand on voit le fonctionnement par éclusées qui peut être sévère.

8.3 Effet des crues sur le recrutement

Le but étant de caractériser et de mesurer l'impact des éclusées sur le recrutement en alevins, il est nécessaire de filtrer les années pour ne conserver que celles qui sont épargnées par les crues.

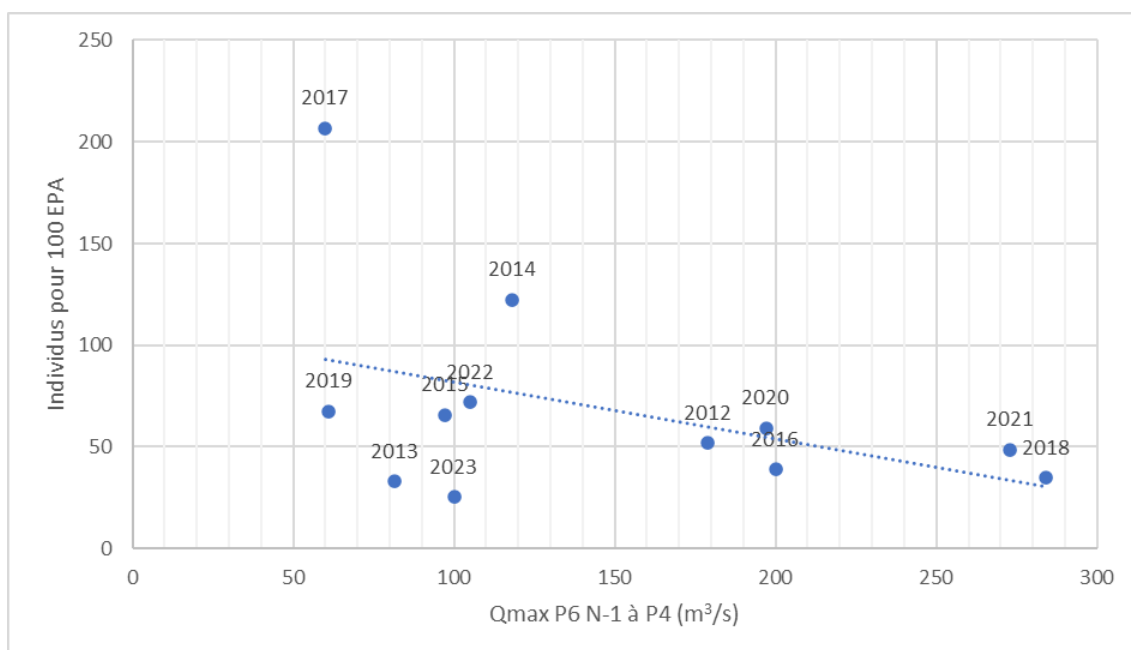


Figure 33 : Relation entre le débit maximal sur les périodes P6 année N-1 à P4 année N et l'abondance en truitelles

La figure ci-dessus corrobore les nombreux travaux déjà effectués sur l'effet des forts débits sur les alevins de truite, à savoir que lorsque le débit maximum rencontré sur la durée du cycle de vie d'un juvénile est important, le recrutement ne peut être bon. On peut donc filtrer les années à crues, sachant qu'est considéré comme « crue » l'occurrence de débits supérieurs à la crue biennale, à savoir 136 m³/s (soit 5.7 fois le module) à la station hydrométrique de Brugale (source : Hydroportail).



Figure 34 : Abondance en alevins de truite à la station 1 par rapport aux crues à Brugale ($C2 = 136 \text{ m}^3/\text{s}$). La période hivernale correspond aux périodes P6 N-1 et P1 tandis que le printemps va de la P2 à la P3.

Nous avons douze années de suivi dont cinq ayant subi une crue hivernale. Et parmi c'est cinq années, deux ont connu une crue printanière en plus de la crue hivernale (2012 et 2016).

On observe clairement un effet des crues qui semblent restreindre les potentialités de recrutement au vu des valeurs maximales des classes qui décroissent quand elles sont concernées par des crues. Pour autant, certaines années interrogent par leur recrutement équivalent voire moindre par rapport aux années ayant subi des crues (2013, 2023) et confirment l'intérêt de l'étude du facteur « éclusées » puisque les crues ne suffisent manifestement pas à expliquer la variabilité interannuelle du recrutement. D'autres facteurs rentrent certainement en compte comme la thermie. En outre, on ne note pas d'impact cumulatif des crues.

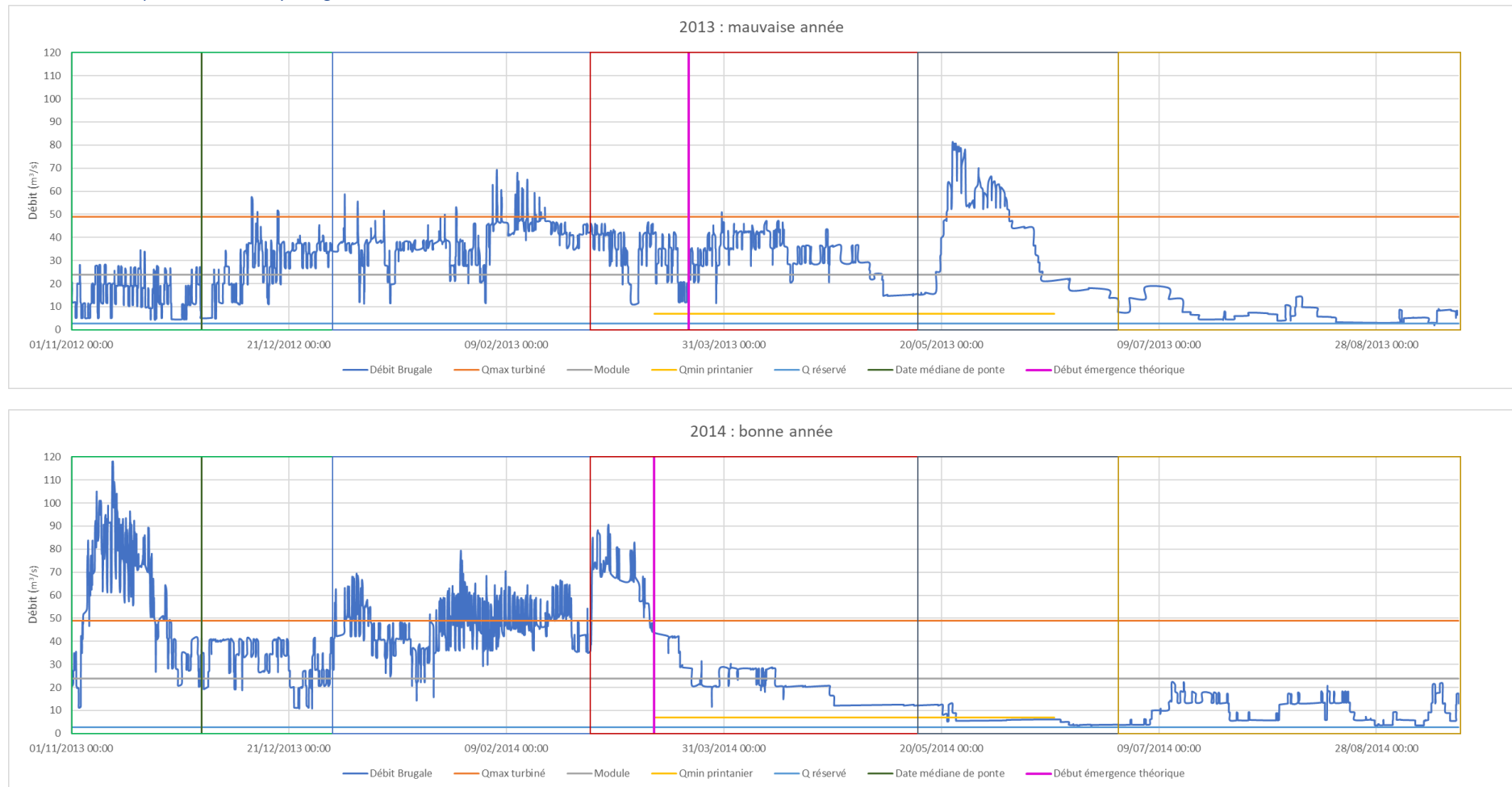
La situation est donc la suivante : lorsque qu'une crue se produit, le recrutement à la fin de l'été ne peut pas être « bon » ; mais l'absence de crue ne signifie pas que le recrutement sera forcément bon, il pourra autant être bon que mauvais en fonction des autres facteurs qui rentrent en compte (éclusées, thermie).

Dans la suite de la partie 8, parmi les sept années restantes, seront confrontées **les deux meilleures années (2014 et 2017)** de recrutement aux **deux moins bonnes (2013 et 2023)**, avec pour facteurs explicatifs l'hydrologie, les éclusées et la thermie.

8.4 Analyse de la variabilité des années sans crues

8.4.1 Comparaison des hydrologies influencées

8.4.1.1 Comparaison des hydrogrammes



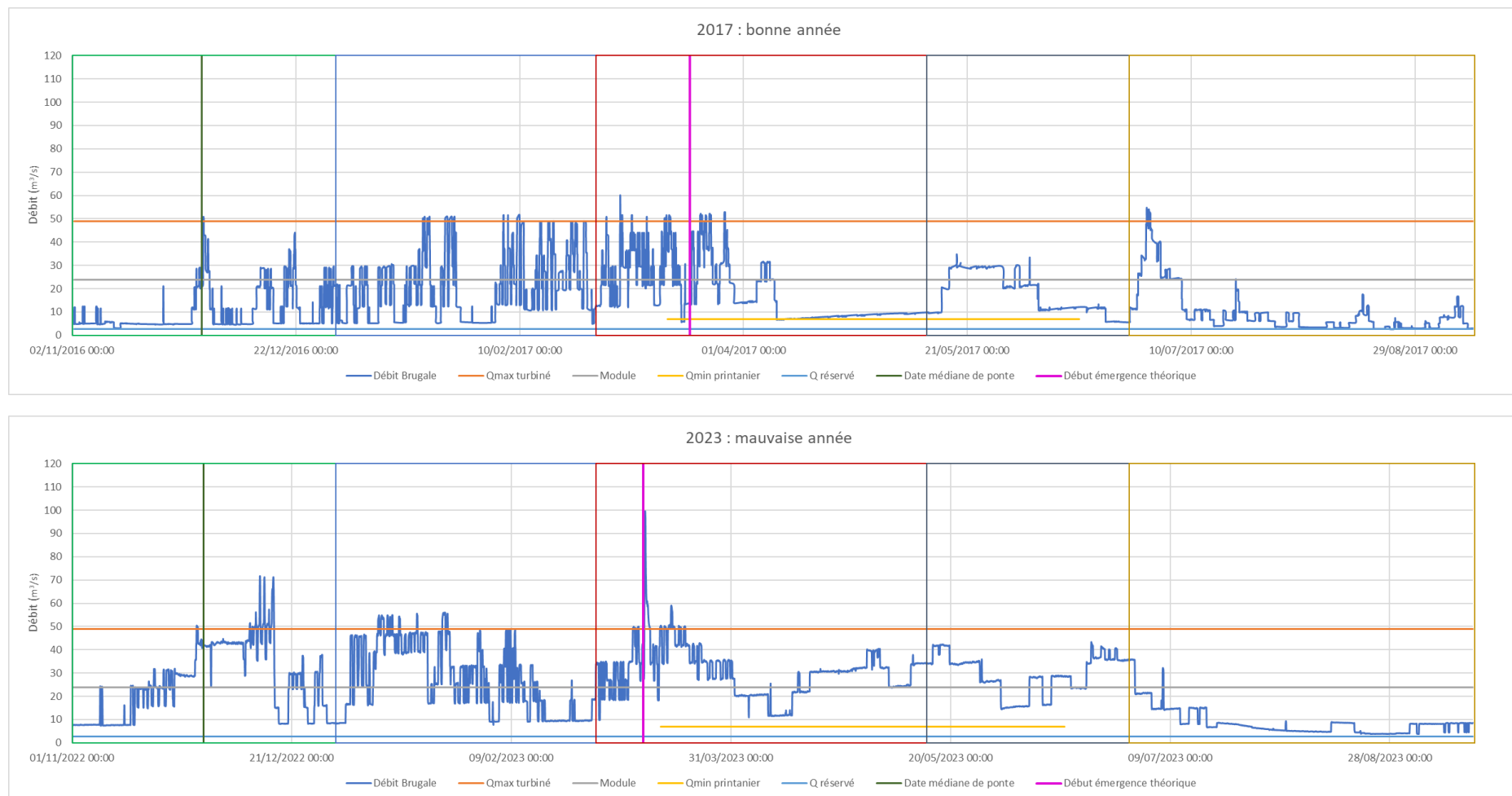


Figure 35 : Hydrogrammes de la Cère à Brugale de novembre à septembre. Les encadrés correspondent au découpage des périodes : P6 N-1 en vert puis P1 à P4 en continuant vers la droite

Le premier élément qui ressort des hydrogrammes est l'activité hydroélectrique intense en période hivernale quelle que soit l'année. On y retrouve un grand nombre d'éclusées et ce même en 2014 et 2017 ce qui montre que l'impact est moindre voire nul sous réserve que les œufs sont enfouis dans le substrat et que les frayères restent immergées. **La période d'incubation peut donc être retirée de l'analyse en vue de discriminer les bonnes des mauvaises années de recrutement.** En 2014, on a même des déversés importants en hiver au niveau du barrage de Brugale, mais les débits restent en dessous de la C2. **Les débits inférieurs à ce seuil ne semblent donc pas affecter les frayères de la Cère aval, vraisemblablement car pas suffisamment forts pour entraîner les graviers et galets des frayères.**

La différence se fait en revanche durant la période printanière avec un ralentissement du régime d'éclusées à partir du *début d'émergence théorique*² des alevins en 2014 et 2017, couplé à des périodes de grande stabilité hydrologique, alors que les éclusées se poursuivent, à cette période très sensible en 2013 et 2023. En rentrant dans le détail, la période P2 en 2017 est à deux visages avec une première partie marquée par les éclusées et une seconde très calme et favorable. Pourtant l'émergence débute dans la partie perturbée par les éclusées : trois semaines d'éclusées s'écoulent à compter de la date théorique d'émergence. La non-répercussion sur le niveau de recrutement peut s'expliquer par l'allure que prend la courbe d'émergence des alevins, à savoir une gaussienne avec un apex décalé par rapport au début d'émergence. Le gros de l'émergence s'est donc probablement produit après l'arrêt des éclusées ; contrairement à 2023 où la phase d'activité hydroélectrique intense a duré plus longtemps après le début d'émergence.

Quant à la période estivale, l'activité hydroélectrique est plus marquée lors des deux bonnes années 2014 et 2017 par rapport au deux mauvaises 2013 et 2023, ce qui là aussi témoigne d'une faible sensibilité des alevins durant cette période. Cette faible sensibilité peut être attribuée à la plus grande robustesse des alevins à cette époque-là qui ont eu plus de temps pour se développer ; mais aussi à la faible intensité des éclusées estivales (faibles débits turbinés, globalement inférieurs au module).

On peut donc ressortir de l'analyse que le nombre d'éclusées à partir du début d'émergence jusqu'en P3 inclus semble expliquer, au moins en partie, le succès du recrutement, les années sans crue dépassant la C2.

² Calculée à partir de la date médiane de ponte observée sur le terrain (dans le cadre du suivi de la reproduction des grands salmonidés pour MIGADO), à partir de laquelle on compte 715°C/jour, soit la durée moyenne d'émergence des alevins de truite (donnée issue du suivi de l'émergence des salmonidés sur la Maronne – Cazeneuve & Kardacz (2015))

8.4.1.2 Hydrologie à l'échelle mensuelle

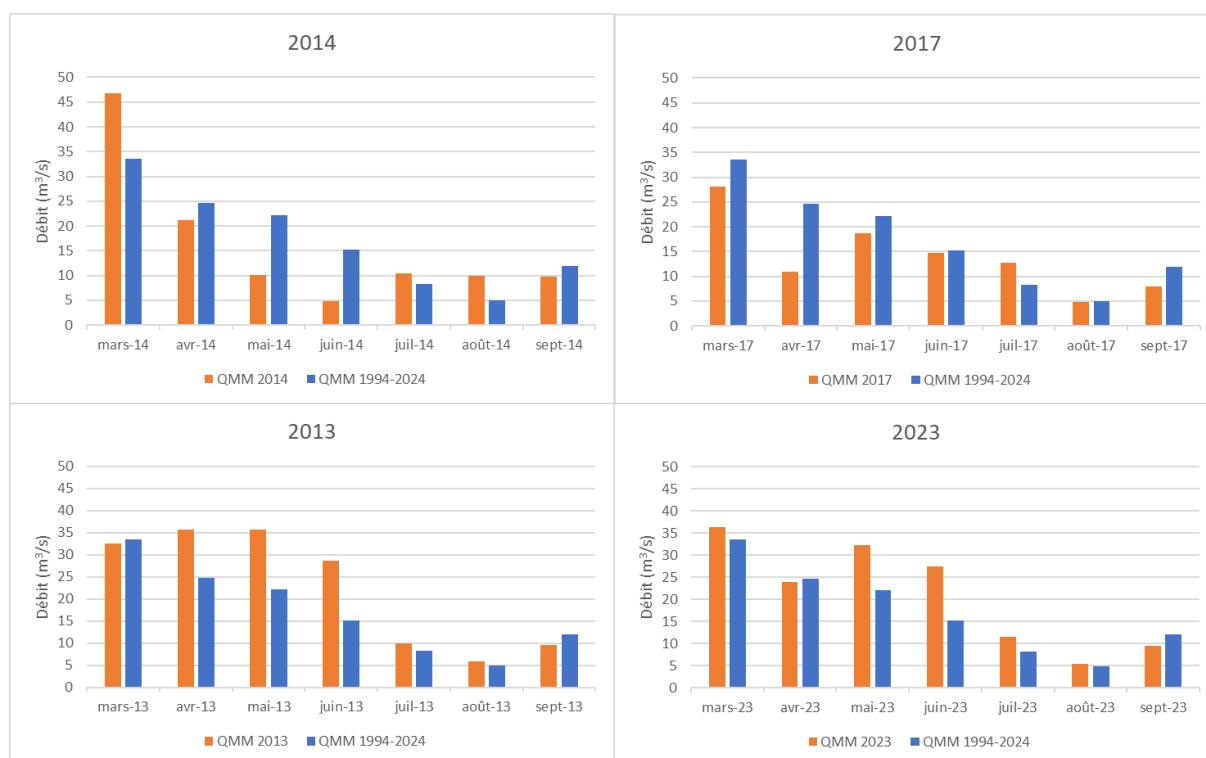


Figure 36 : Débits moyens mensuels par rapport à la moyenne interannuelle (hors P6 N-1 et P1, reproduction et vie sous graviers, qui les années sans crue, n'affectent pas le recrutement – voir paragraphe précédent)

Tableau 13 : Coefficients mensuels d'hydraulicité. Correspond au rapport entre le débit moyen mensuel d'une année et le débit moyen mensuel interannuel.

	2013	2014	2017	2023
mars	0.97	1.40	0.84	1.09
avr	1.45	0.85	0.45	0.97
mai	1.62	0.46	0.85	1.46
juin	1.89	0.32	0.97	1.81
juil	1.19	1.26	1.55	1.40
août	1.19	2.02	0.98	1.09
sept	0.79	0.82	0.66	0.79

0.25 - 0.5	0.5 - 0.8	0.8 - 1.2	1.2 - 2	> 2
------------	-----------	-----------	---------	-----

Les années 2014 et 2017 se démarquent par une **hydrologie printanière plutôt déficitaire** alors qu'au contraire 2013 et 2023 ont des débits largement excédentaires à cette période. L'hydrologie estivale est normale à excédentaire pour les 4 années, et même très excédentaire pour le mois d'août 2014.

Si l'on fait le lien avec l'émergence qui débute en moyenne à la mi-mars avec un pic décalé, on constate que l'hydrologie d'avril à juin des quatre années et le recrutement en truitelles en fin d'été coïncide avec la bibliographie qui fait part d'une sensibilité accrue des alevins de truite aux débits soutenus en période d'émergence (forte hydraulicité en avril, mai et juin conduit à un faible recrutement en fin d'été). En effet, la capacité de nage des alevins à ce stade est très faible les rendant ainsi particulièrement vulnérables aux forts débits (Jensen & Johnsen, 1999) qui réduisent la disponibilité en habitats favorables et augmentent la dépense énergétique pour le maintien en place ; ce qui induit

une plus forte mortalité in fine. Plus précisément, les forts débits à l'émergence et la vulnérabilité inhérente des alevins sont associés au phénomène de dérive forcée qui induit un déplacement des individus vers l'aval. Or les alevins ne retrouvent pas forcément un habitat favorable et pâtissent d'un rendement énergétique défavorable. En effet, le coût énergétique augmente à cause des fortes vitesses qui s'opposent au besoin de maintien de la position dans le chenal alors même que la capacité à s'alimenter se voit réduite dans de telles conditions de perturbation hydrologique (Nicola et al., 2009). C'est pourquoi les crues ont de forts effets négatifs sur les larves à l'émergence (Bergerot & Cattaneo, 2017; Hayes et al., 2010; Ladoux, 2021) et l'abondance en alevins de truite est très souvent corrélée au débit maximal journalier observé durant la période d'émergence (Baran et al., 2014; Bret et al., 2016).

8.4.1.3 Débits classés et durée de dépassement de débits-seuils

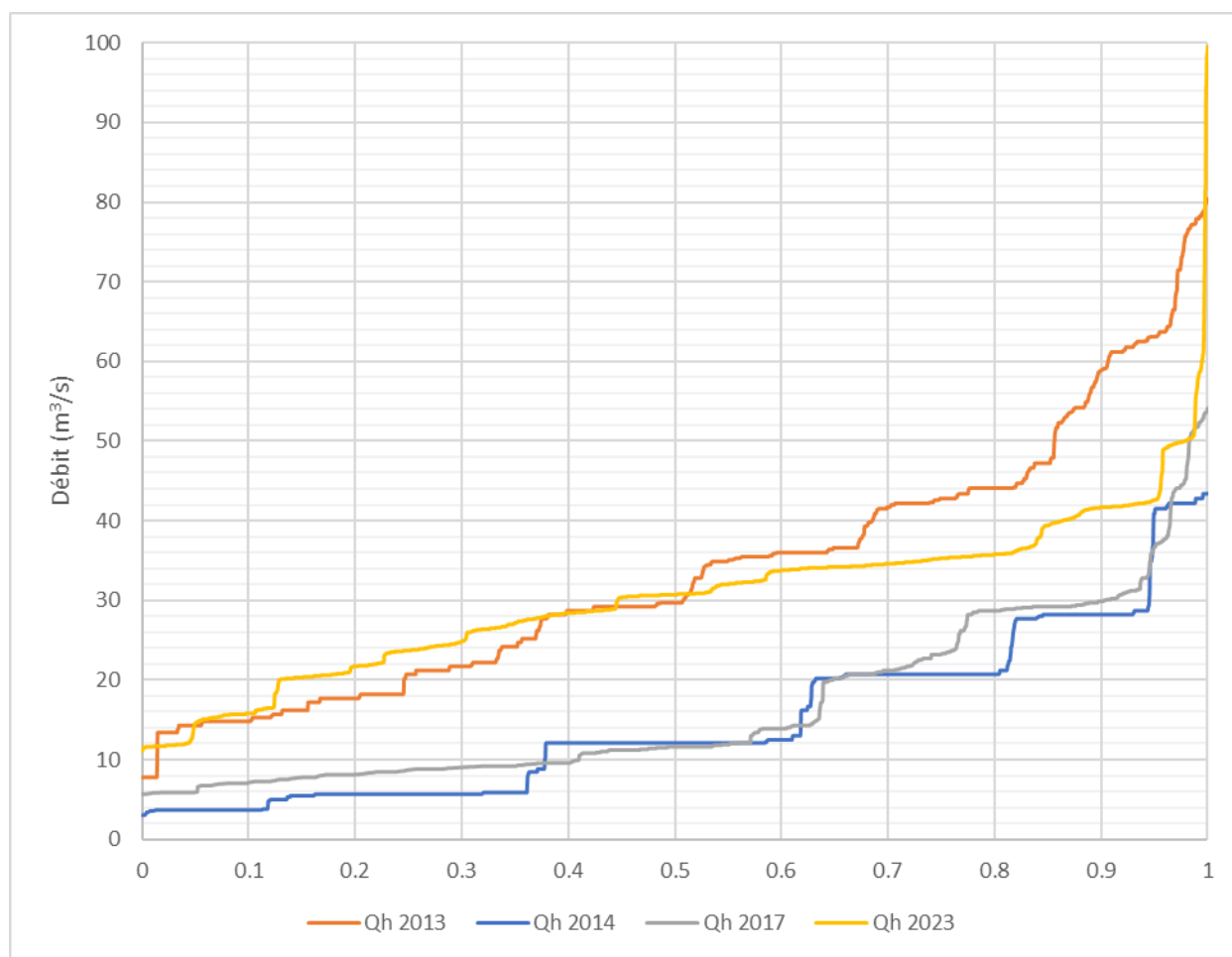


Figure 37 : Courbes des débits horaires à Brugale classés, **du début d'émergence théorique à la fin de P3**, fréquences de non dépassement

Sur la Figure 37, qui représente les débits classés, la différence entre les bonnes et les mauvaises années de recrutement est très claire : les paires 2014-2017 (bon recrutement) et 2013-2023 (mauvais recrutement) se séparent nettement. Les bonnes années sont caractérisées par des débits printaniers qui restent le plus souvent faibles, alors qu'ils sont plus forts en intensité et en durée les mauvaises années. Par exemple, le débit médian des bonnes années vaut environ 12 m³/s alors qu'il atteint les 30 m³/s en 2013 et 2023.

Capra (1998) a mis en exergue le seuil du module plus deux écarts-type pour caractériser le seuil d'impact des débits en post émergence sur le recrutement ; soit en l'occurrence environ $2.1 \times \text{Mod}$ dans le cas de la Cère. En parallèle, l'auteur a mis en évidence un impact significatif sur le recrutement en truite des débits de mars à mai, période qui dans notre cas peut être ajustée à la date de début d'émergence théorique pour plus de précision dans l'analyse. Nous avons donc considéré quatre seuils, 75% du module, 1, 1.5 et 2 fois le module et avons calculé pour les mois printaniers et pour chacune des années le pourcentage de temps passé par les débits au-dessus de ces seuils.

Tableau 14 : Pourcentage de temps où le débit est supérieur à un seuil donné

	2*Mod (47.8 m ³ /s)				1.5*Mod (35.85 m ³ /s)			
	2013	2014	2017	2023	2013	2014	2017	2023
Début émergence théorique - fin mars	0%	0%	0%	10%	44%	35%	33%	57%
Avril	0%	0%	0%	0%	47%	0%	0%	0%
Mai	35%	0%	0%	0%	39%	0%	0%	23%
Juin	13%	0%	3%	0%	33%	0%	3%	20%

	1*Mod (23.9 m ³ /s)				0.75*Mod (17.25 m ³ /s)			
	2013	2014	2017	2023	2013	2014	2017	2023
Début émergence théorique - fin mars	100%	65%	58%	100%	100%	100%	83%	100%
Avril	97%	30%	7%	47%	100%	80%	13%	80%
Mai	55%	0%	39%	97%	65%	0%	55%	100%
Juin	37%	0%	13%	67%	87%	0%	27%	77%

On constate que le seuil de $2 \times \text{Mod}$ n'est quasiment pas dépassé et ce même lors des mauvaises années de recrutement. C'est à $1.5 \times \text{Mod}$ que l'on commence à déceler un effet seuil avec des pourcentages de dépassement plus important en 2013 et 2023, notamment à partir du mois d'avril. Cet effet seuil se retrouve aussi à $1 \times \text{Mod}$ puis devient moins évident à 75% du module où de forts pourcentages de dépassement sont observés même dans les bonnes années de recrutement (80% en avril 2014 notamment). Dans le cas de la Cère, le seuil au-delà duquel **le recrutement en truite est pénalisé** se situe donc vraisemblablement **entre 1 et 1.5 fois le module** à Brugale : plus la durée de dépassement de ce débit s'allonge, moins le recrutement a de chance d'être bon.

On a donc un impact pour un seuil moindre que celui qui avait été mis en évidence par Capra (1998), ce qui peut s'expliquer par la configuration hydromorphologique de la Cère. Là où l'auteur s'appuyait sur trois cours d'eau de taille modeste (environ 25 km de longueur pour une largeur moyenne inférieure à 10 m), la Cère à Mespoulet-bas est bien plus grande et se situe dans une zone encaissée à chenal unique laissant ainsi les alevins plus exposés aux coups d'eau. De plus, l'incision avérée qui s'opère en aval du barrage suite au déficit sédimentaire exacerbe certainement la sensibilité des alevins aux forts débits.

8.4.2 Comparaison par rapport à la situation hydrologique naturelle

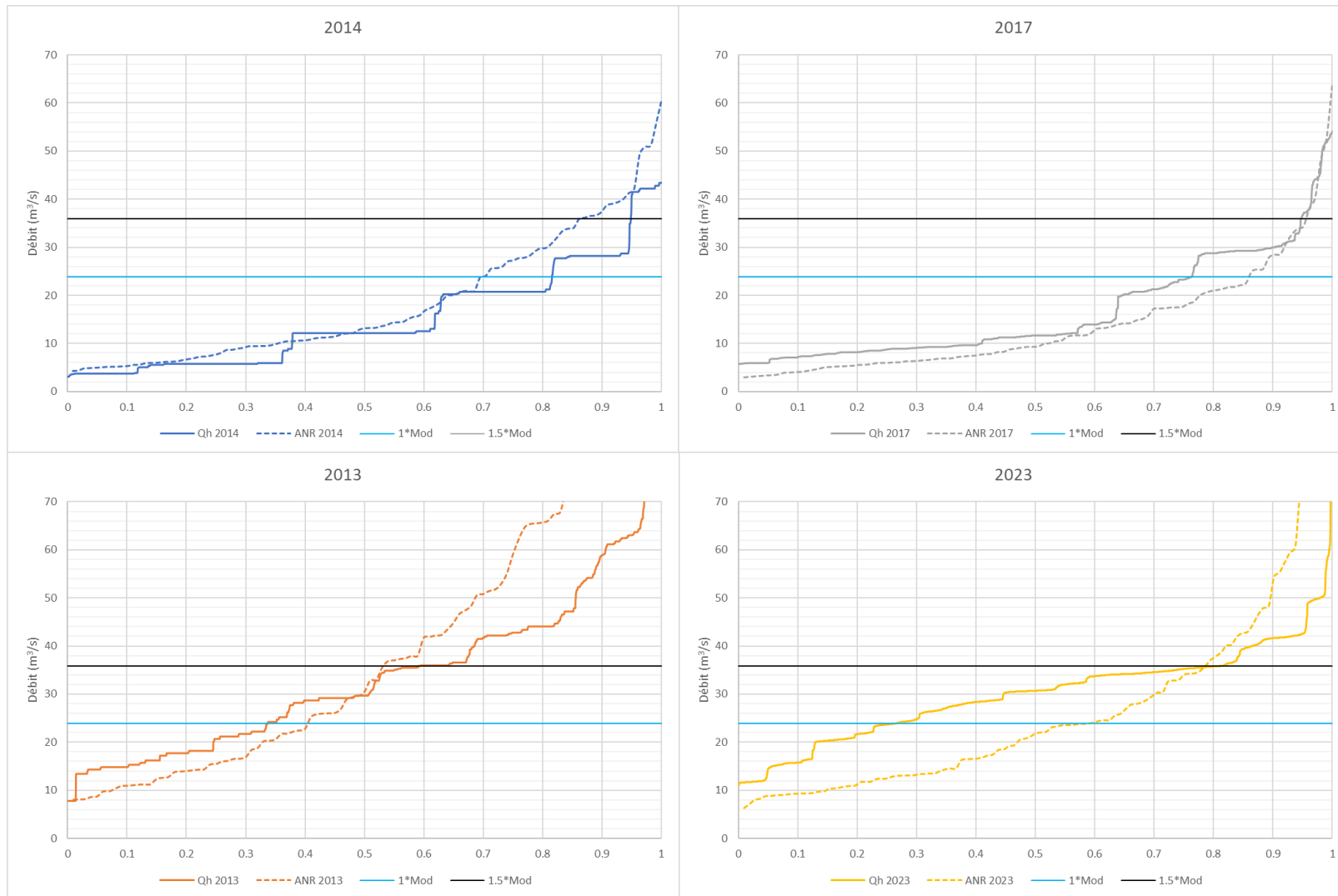


Figure 38 : Courbes des débits classés – débits réels à Brugale VS débits naturels reconstitués, du début d'émergence théorique à la fin de P3, fréquences de non dépassement

En reprenant les seuils d'impacts mis en évidence dans la partie précédente, on peut comparer les durées de dépassement en situation réelle par rapport à la situation naturelle. Laquelle des deux serait la plus favorable à la productivité en truitelles au regard de l'hydrologie ?

En 2014, la courbe des ANR est plus souvent au-dessus de celle des débits réels turbinés et la fréquence de dépassement des seuils est légèrement plus élevée en ANR. En 2017, c'est le contraire : la fréquence de dépassement est légèrement plus faible en ANR. Quant aux deux mauvaises années, 2013 et 2023, on observe une inversion des courbes à partir d'1.5 fois le module : les débits supérieurs à ce seuil sont bien plus fréquents en situation réelle qu'en situation naturelle, à plus forte raison en 2013. Alors qu'à l'inverse, les dépassements à une fois le module sont moins fréquents en ANR, particulièrement en 2023 où l'écart est de 30% entre les deux situations (42% en ANR contre 74% en débit réel).

A noter qu'on distingue particulièrement bien en 2014 les différents paliers d'exploitation des turbines (nombre de turbines en fonctionnement), matérialisés par le motif en « marches d'escaliers » sur la courbe des débits réels.

Tableau 15 : Pourcentage de jours où le débit en **ANR** est supérieur aux seuils d'impact

	1.5*Mod (35.85 m ³ /s)				1*Mod (23.9 m ³ /s)			
	2013	2014	2017	2023	2013	2014	2017	2023
Début émergence théorique - fin mars	89%	59%	0%	52%	100%	100%	17%	90%
Avril	63%	7%	0%	33%	83%	30%	0%	60%
Mai	52%	13%	10%	3%	55%	23%	29%	23%
Juin	10%	0%	7%	7%	27%	0%	13%	10%
Total	47%	15%	5%	22%	60%	30%	14%	42%

Tableau 16 : Pourcentage de jours où le débit **réel** est supérieur aux seuils d'impact

	1.5*Mod (35.85 m ³ /s)				1*Mod (23.9 m ³ /s)			
	2013	2014	2017	2023	2013	2014	2017	2023
Début émergence théorique - fin mars	44%	35%	33%	57%	100%	65%	58%	100%
Avril	47%	0%	0%	0%	97%	30%	7%	47%
Mai	39%	0%	0%	23%	55%	0%	39%	97%
Juin	33%	0%	3%	20%	37%	0%	13%	67%
Total	41%	5%	6%	19%	67%	18%	24%	74%

Si on zoome à l'échelle mensuelle, voici ce que l'on peut observer :

Effet des aménagements hydroélectriques à **1.5 fois** le module par rapport aux ANR :

- En 2013, on constate une réduction sensible des dépassements par rapport aux ANR jusqu'en mai, suivie d'une légère augmentation en juin.
- 2014 affiche une réduction globale des dépassements, particulièrement en mars.
- 2017 connaît une augmentation seulement mars, mais notable (de 0 à 33%).
- Puis enfin en 2023, on note une suppression des dépassements en avril mais une augmentation en mai et en juin.

Effet des aménagements hydroélectriques à **1 fois** le module par rapport aux ANR :

- Il n'y a pas de changement global en 2013, mais une légère augmentation en avril (fréquences très élevées qu'importe la situation) et en juin est tout de même à signaler.

- En 2014, on observe une nette diminution des dépassements en mars (mais qui restent toutefois fréquents) et une suppression des dépassements en mai.
- Il y a une forte augmentation des dépassements en mars 2017 (de « peu fréquents » à « plus de la moitié du temps ») et une augmentation légère les mois d'avril et mai.
- Une très forte augmentation des dépassements est observée en mai-juin 2023 tandis qu'avril voit sa fréquence légèrement réduire.

Nous venons de décrire l'effet des aménagements sur les durées de débits. D'un point de vue « intensité des forts débits », la figure suivante montre que les Qmax sont supérieurs, voire très supérieurs, en ANR. Les coups d'eau en situation naturelle des deux bonnes années n'auraient pas été bien plus impactant, tandis que ceux de 2013 et 2023 auraient été respectivement deux et deux fois et demi plus forts en ANR. On peut raisonnablement penser que de telles valeurs de débit auraient réduit à peau de chagrin le recrutement en truitelles (sans aucun doute pour 2023).

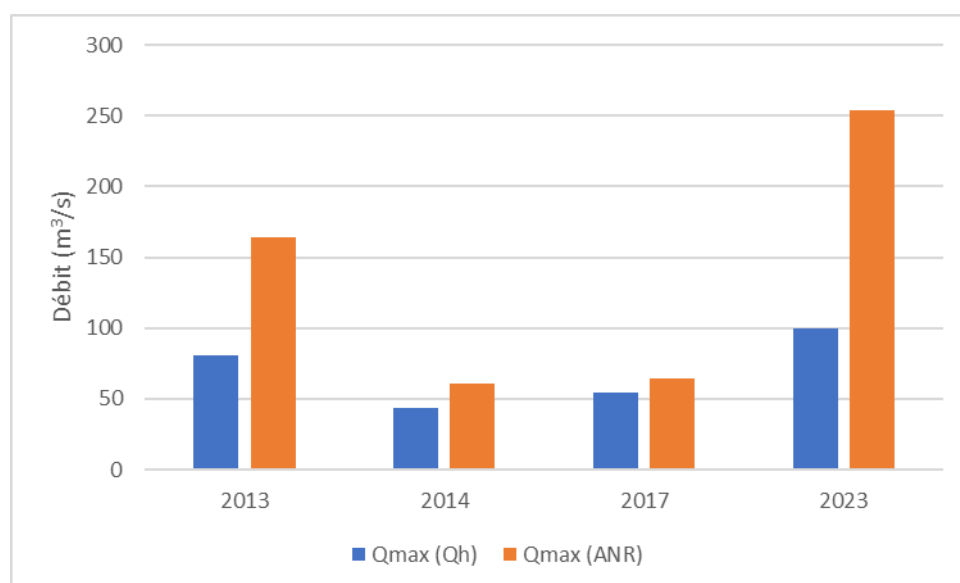


Figure 39 : Débits maximaux du début d'émergence théorique à la fin de P3, en situation réelle VS en ANR

En somme, le complexe d'aménagements hydroélectriques le long de l'axe Cère provoque un **écrêtement des crues, parfois conséquent**, comme c'est le cas en 2013 et 2023. Les mauvaises années le serait donc probablement aussi resté en situation de régime naturel compte tenu de l'intensité des coups d'eau exacerbée en ANR. **L'effet sur les durées est variable selon les années** avec dans certains cas un allongement de la durée au-delà des seuils critiques de débit (2017) et d'autres une réduction (2013 et 2014). La situation est moins claire en 2023 avec certains mois plus favorables en ANR et d'autres le contraire. L'amélioration que laisse entrevoir la réduction de la fréquence des dépassements de seuils en 2013 et 2014 est évidemment relative car les aménagements entraînent par la même occasion des éclusées dont l'impact sur le recrutement est avéré.

8.4.3 Comparaison des régimes d'éclusées

8.4.3.1 Résultats de l'indicateur éclusées par périodes biologiques

Tableau 17 : Résultats de l'indicateur éclusées à Brugale des périodes 2 à 4 pour les quatre années caractéristiques – la P2 ajustée correspond au début d'émergence théorique jusqu'à la fin de P2

	P2 ajustée	P3	P4
2013	2+	1	1
2014	1	1	2-
2017	3-	1	2-
2023	3-	1	1

L'impact des éclusées étant relatif tant que les nids de frai restent immergés, nous pouvons ajuster la P2, période où se déroule l'émergence des alevins, par rapport à la date de début d'émergence de l'année en question. Cela permet de calculer un indice de perturbation hydrologique fidèle aux conditions de vie des alevins rencontrées à la sortie des nids.

On remarque que c'est l'année 2014 qui apparaît comme la moins perturbée des quatre hydrologiquement avec une P2 en classe 1 soit une perturbation « sensible » simplement, alors qu'elle est « très marquée » en 2017 et 2023. La P3 est en classe 1 les quatre années. La P4, dont l'indice varie entre 1 et 2-, n'est pas particulièrement discriminante, d'autant plus qu'à cette période les petits alevins devenus de belles truitelles sont bien plus résilients face aux fluctuations des débits.

C'est donc 2017 qui présente les moins bonnes notes des quatre années sur l'ensemble des trois périodes alors même qu'il s'agit de la meilleure année en recrutement. Il est donc nécessaire d'approfondir la question des éclusées en les caractérisant de façon plus fine.

8.4.3.2 Fréquence des éclusées

Chaque éclusée, en fonction de ses caractéristiques, entraîne un risque de piégeage-échouage et de dérive plus ou moins important d'une certaine proportion du stock d'alevins et on comprend donc bien que leur répétition amenuise petit à petit la quantité d'alevins qui a été produite sur les frayères et donc le recrutement en fin d'été (Schmutz et al., 2015).

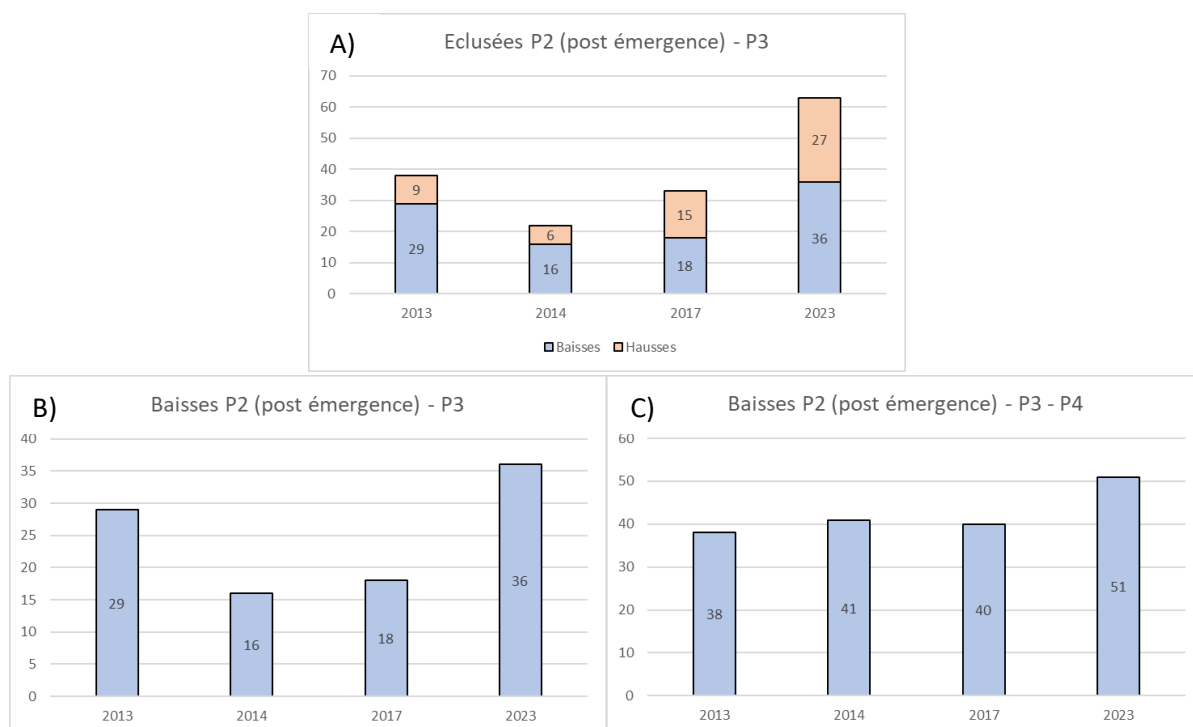


Figure 40 : Nombre d'éclueses. La mention « (post émergence) » indique que seules les baisses ayant eu lieu à partir de la date de début d'émergence théorique des alevins sont comptabilisées

Lorsqu'on ne conserve que les éclueses ayant eu lieu **après la date de début d'émergence théorique calculée** (en ajustant donc le démarrage de P2 au début véritable de l'émergence chaque année), on constate que la fréquence des éclueses est moindre les bonnes années. Mais c'est en représentant uniquement les baisses que l'on obtient les résultats les plus éloquentes. Les deux paires d'années se reforment de façon plus évidente avec le graphique B) : 2013 et 2023 comptabilisent presque le double de baisses que les deux bonnes années. Si l'on ajoute la P4, les quatre années s'homogénéisent avec seulement 2023 qui sort légèrement du lot. Cela confirme donc ce que laissait entrevoir le début de l'analyse (8.4.1.1), à savoir que **la P4 n'est plus une période particulièrement sensible pour les truitelles**.

En ce qui concerne les hausses, on constate qu'elles expliquent moins à elles seules les tendances de recrutement puisque plus nombreuses en 2017 qu'en 2013. Néanmoins la pire année (2023) correspond tout de même au plus grand nombre de hausses post émergence, cela peut être un élément de réponse quant au recrutement encore moins bon en 2023 qu'en 2013.

En somme, **les années de bon ou de mauvais recrutement coïncident bien avec le nombre de baisses d'éclueses depuis l'émergence jusqu'à la P3 incluse**. Bauersfeld (1976) estime à 1.5% la perte du nombre d'alevins de salmonidés par baisse, portant la perte totale d'alevins à 50% pour une saison marquée par une trentaine de baisses d'éclueses. Il n'est donc pas surprenant de voir ressortir ce paramètre dans le cas de la Cère.

8.4.3.3 Débits après baisse

Le débit atteint à la fin d'une baisse d'écluse peut affecter les alevins de truite de différentes manières. Lorsque sa valeur est faible, on a vu qu'il existait un risque de piégeage-échouage, phénomène accru

dans le cas d'une baisse de forte amplitude. Ce phénomène est lié à la diminution de la surface en eau qui se traduit par l'exondation de zones de tenue des juvéniles.

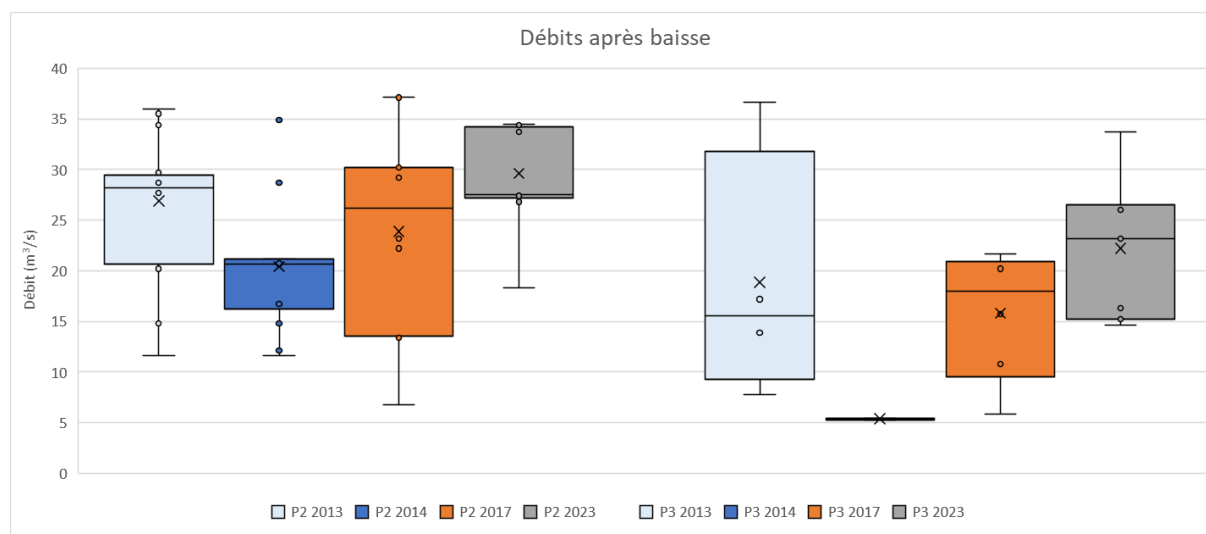


Figure 41 : Débits après baisse en P2 (post émergence) et P3

La représentation en boîtes à moustaches permet de livrer une vision globale du jeu de données en affichant à la fois les quartiles, la médiane, la moyenne, ainsi que les valeurs extrêmes.

En P2 post émergence, les débits après baisse renvoient les valeurs les plus fortes en 2023 et les plus faibles en 2014. En 2017 les valeurs sont plus disparates avec des débits faibles plus fréquents que 2014 (Q1) et le minimum le plus bas, mais avec un débit médian bien supérieur à 2014 tout de même.

En P3, à nouveau les débits sont globalement plus forts en 2023 (Q1 et médiane). C'est en 2013 que le Q3 et le maximum sont les plus forts, mais la boîte est très étirée et la médiane et le Q1 sont plus faibles que 2017 et 2023. La boîte affichée en 2014 n'est pas à considérer puisque seulement deux baisses sont survenues.

Ce qu'on peut retirer de ces informations est que le risque de piégeage-échouage a été plus faible lors des mauvaises années (grâce à des débits après baisse plus forts), ce qui ne va pas dans le sens des recrutements obtenus. A l'inverse, la P2 2014 a certainement été sensible au piégeage-échouage, ce qui peut expliquer le moindre recrutement qu'en 2017.

En somme, on retrouve donc de plus fortes valeurs de débit après baisse d'éclusee dans le cas des mauvaises années. Le mauvais recrutement en 2013 et 2023 ne peut donc pas être attribué uniquement à l'intensité du piégeage-échouage d'alevins.

8.4.3.4 Amplitude des baisses et des hausses

L'amplitude rapporte l'écart entre le débit maximum affiché avant le début de la baisse d'éclusee et le débit atteint à la fin de la baisse. Plus elle est grande, plus la différence de surface en eau entre les deux débits est grande (et donc les surfaces exondées), plus les changements de localisation des habitats favorables sont importants et donc plus le risque de piégeage-échouage s'accroît.

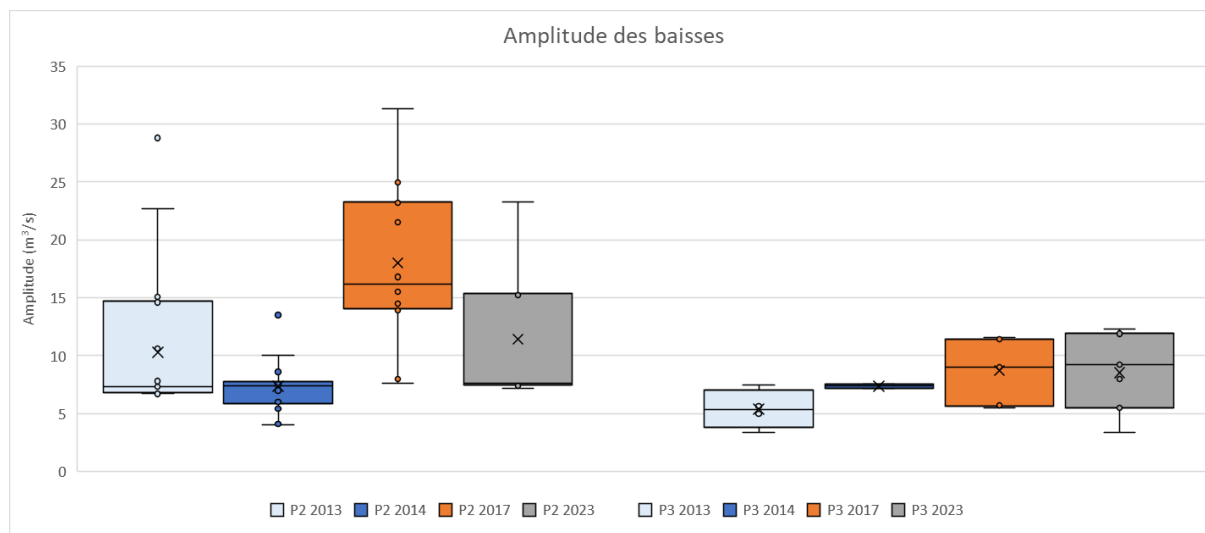


Figure 42 : Amplitude des baisses en P2 (post émergence théorique) et P3

Ce paramètre ne semble cependant pas expliquer le bon ou mauvais recrutement selon les années. En effet les amplitudes sont nettement supérieures en P2 2017, de même en P3 (avec 2023).

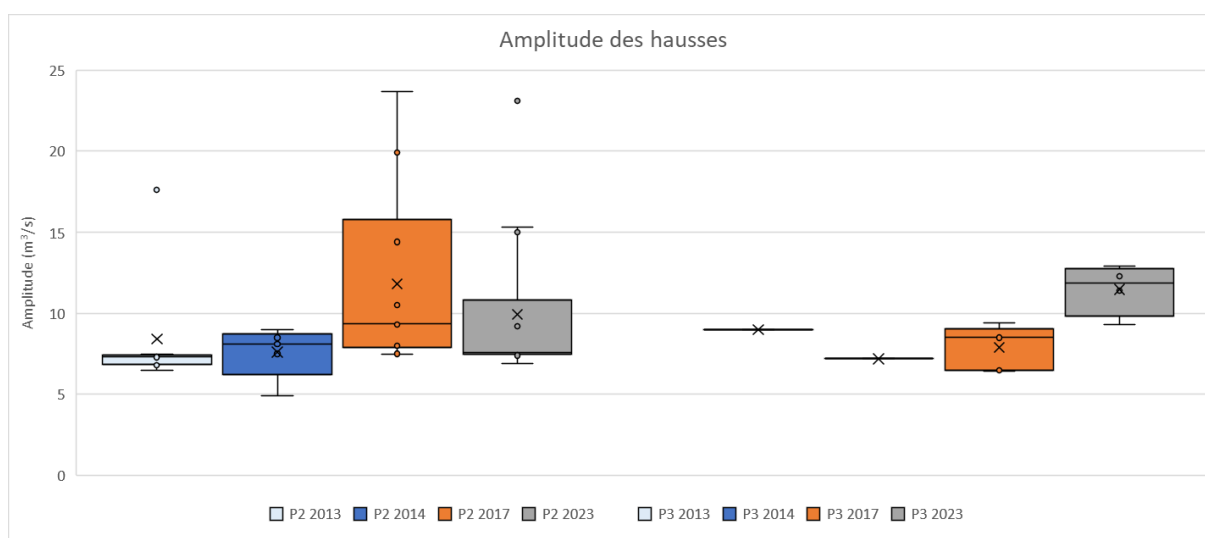


Figure 43 : Amplitude des hausses en P2 (post émergence théorique) et P3

Concernant l'amplitude des hausses, la situation en P2 est la même que pour les baisses avec des amplitudes nettement supérieures en 2017.

En P3 néanmoins, les amplitudes sont bien plus importantes en 2023. **Toutefois, les hausses en P3 sont très peu nombreuses. Leur influence est donc à relativiser.**

8.4.3.5 Gradient des baisses et des hausses

Le gradient des baisses (i.e. la vitesse de la baisse) influe aussi sur l'impact que peut avoir une éclusée sur la survie des alevins. Plusieurs études montrent que le piégeage-échouage est d'autant plus fort que les gradients de baisses sont élevés (Bradford et al., 1995; Hessevik, 2002). En effet, plus il est fort, plus l'exondation des zones piégeuses se fait rapidement et moins les alevins ont de temps pour quitter ces zones et éviter le phénomène de piégeage-échouage. A la hausse, plus les gradients sont rapides, plus les alevins sont exposés au risque de dérive forcée, n'ayant pas le temps et la possibilité de se réfugier dans les zones de moindre vélocité.

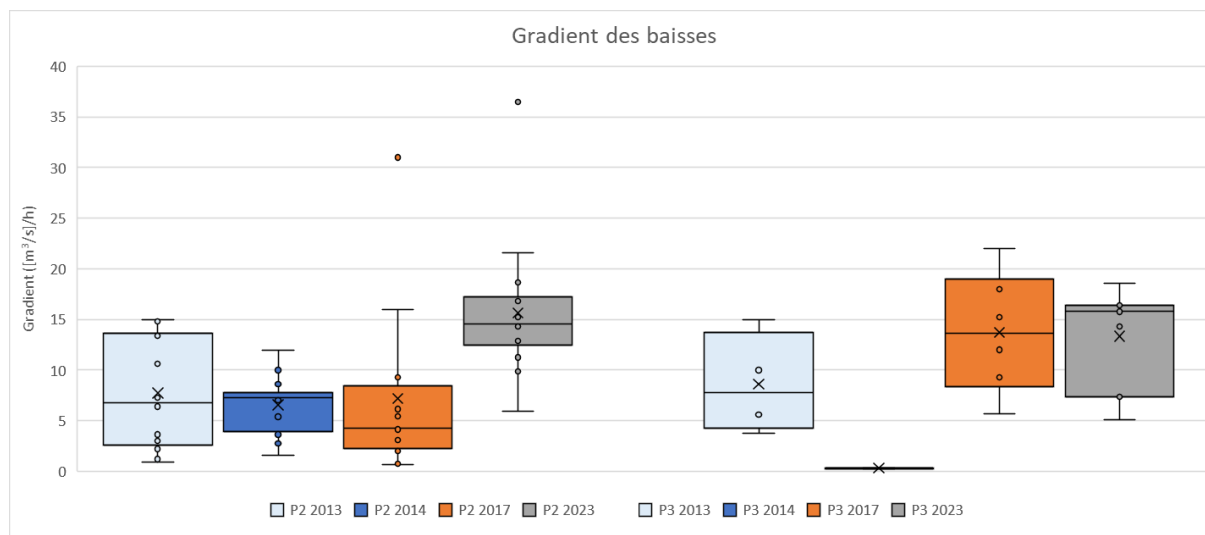


Figure 44 : Gradient des baisses en P2 (post émergence théorique) et P3

En effet, le box plot de la P2 2023 se distingue assez nettement par le haut avec une médiane de gradient de baisse autour des 15 m³/s/h, deux à trois fois plus importante que pour les autres années, et une distribution compacte de l'ensemble des gradients autour de cette médiane. La P2 2013 se distingue aussi des bonnes années 2014 et 2017, avec un troisième quartile de la distribution des gradients de baisse qui atteint lui aussi pratiquement les 15 m³/s/h (donc un certain nombre d'éclusées qui vont présenter des baisses très rapides par rapport aux bonnes années).

En revanche en P3, les gradients ne semblent pas avoir autant influencé le recrutement puisque le troisième quartile de 2017 est le plus élevé (même si la médiane reste supérieure en 2023).

Si l'on confronte ces informations aux débits après baisse, on peut dire que les gradients de baisse, même si supérieurs en 2013 et 2023, ne sont vraisemblablement pas responsables d'un abattement important du nombre d'alevins par piégeage-échouage. En effet les débits après baisse sont restés hauts ces années-ci, ce qui a limité l'ampleur du dénoisement et de la déconnexion des zones de piégeage.

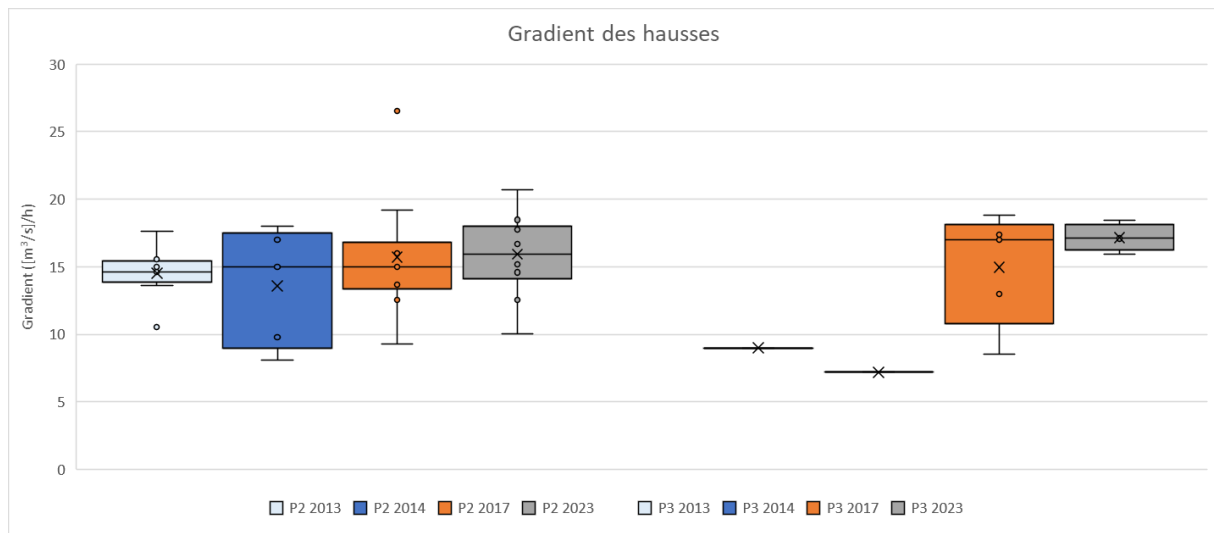


Figure 45 : Gradient des hausses en P2 (post émergence théorique) et P3

Quant aux gradients des hausses, la P2 est très homogène au regard des valeurs médianes (et des troisième quartile) et n'est pas discriminante entre les années.

La P3 2023 présente des gradients de hausse plus forts plus fréquents que 2017 mais encore une fois, le faible nombre de hausses invite à ne pas tenir compte de ces résultats. D'autant plus que nous n'avons pas affaire à des gradients extrêmes dont un seul évènement pourrait à lui seul décimer le recrutement.

En somme, mis à part l'effet **de la fréquence** des baisses d'écluesées, leurs **caractéristiques sous-jacentes telles que l'amplitude et les gradients ne semblent pas jouer un rôle prépondérant** dans le recrutement en truitelles obtenu in fine sur la Cère.

8.4.4 Comparaison des régimes thermiques

8.4.4.1 Comparaison des thermogrammes





Figure 46 : Thermogrammes de la Cère à Mespoulet-bas de novembre à septembre. Les encadrés correspondent au découpage des périodes : P6 N-1 en vert puis P1 à P4 en continuant vers la droite

La truite est un poisson avec des exigences relativement strictes en matière de température de l'eau par rapport aux autres espèces peuplant la Cère.

La période hivernale des années 2014 et 2023 est plus douce qu'en 2013 et 2017 ce qui se traduit par une émergence plus tardive ces deux dernières années. La P2 marque le début de la hausse progressive des températures jusqu'à la période estivale. La gamme optimale de vie en eau libre de l'alevin nageant se situe entre 4 et 17°C (Elliott & Elliott, 1995) au-delà de quoi le stress thermique affecte la majorité des individus et leur alimentation. Le seuil des 17°C est franchi les quatre années. Il est franchi plus précocement lors des deux bonnes années. L'année 2014 est la plus favorable d'un point de vue thermique estivale, c'est la seule qui reste en dessous de 18°C. Les trois autres dépassent à de nombreuses reprises les 17°C, surtout 2023 où le seuil est dépassé de façon quasi constante en P4 (53 jours au total, 28 jours consécutifs au maximum soit presque un mois complet ! Tableau 18). La température de l'eau atteint même les 20°C cette année-là. A noter qu'en 2017 la période de plus fortes températures débute plus tôt que les autres années, qu'elle est très hétérogène (24 jours supérieurs à 17°C mais seulement une semaine consécutive, plus petite durée au-dessus du seuil des quatre années) avec des pics de chaleur plus nombreux qu'en 2013 (un seul pic de deux semaines plus long et plus chaud) mais avec des incursions fraîches à très fraîches (début de P4 particulièrement frais). C'est cette hétérogénéité qui explique le fait que la température moyenne maximale sur trente et sept jours soit malgré tout inférieure à l'optimum thermique en 2017 et non en 2013.

Tableau 18 : Nombre de jours supérieurs et nombre maximal de jours consécutifs supérieurs à l'optimum thermique chez le juvénile de truite (17°C)

Année	Nb jours >17°C	Nb max jours consécutifs >17°C
2013	16	12
2014	7	8
2017	24	7
2023	53	28

8.4.4.2 Focus sur les basses températures

Le seuil bas de l'optimum thermique se situe aux alentours des 2°C pour l'embryon de truite, or la température ne descend pas en dessous de 4.1°C sur ces quatre années (3.8°C en instantané). Le stade œuf peut d'ores et déjà être écarté pour discriminer les années, **aucune d'entre elles n'étant suffisamment froide pour affecter la survie intragravellaire.**

Tableau 19 : Températures moyennes journalières minimales à Mespoulet-bas

Mois	Tmin			
	2013	2014	2017	2023
Déc	6.9	6.3	6.0	6.5
Janv	5.0	6.3	4.2	5.0
Févr	4.1	6.2	5.3	4.6
Mars	5.0	6.4	6.4	4.8

Quant au stade alevin émergent, la bibliographie indique que les basses températures peuvent être responsables de mortalités. Jensen & Johnsen (1999) ont en effet montré que le taux de mortalité des truitelles est plus élevé lors des années où les températures à l'émergence sont les plus basses. Parmi les quatre années, l'émergence théorique débute au plus tôt le 11/03 (2023) et le 23/03 au plus

tard (2013). On peut donc cibler les températures des mois de mars et avril pour décrire les conditions de température rencontrées par les alevins émergents.

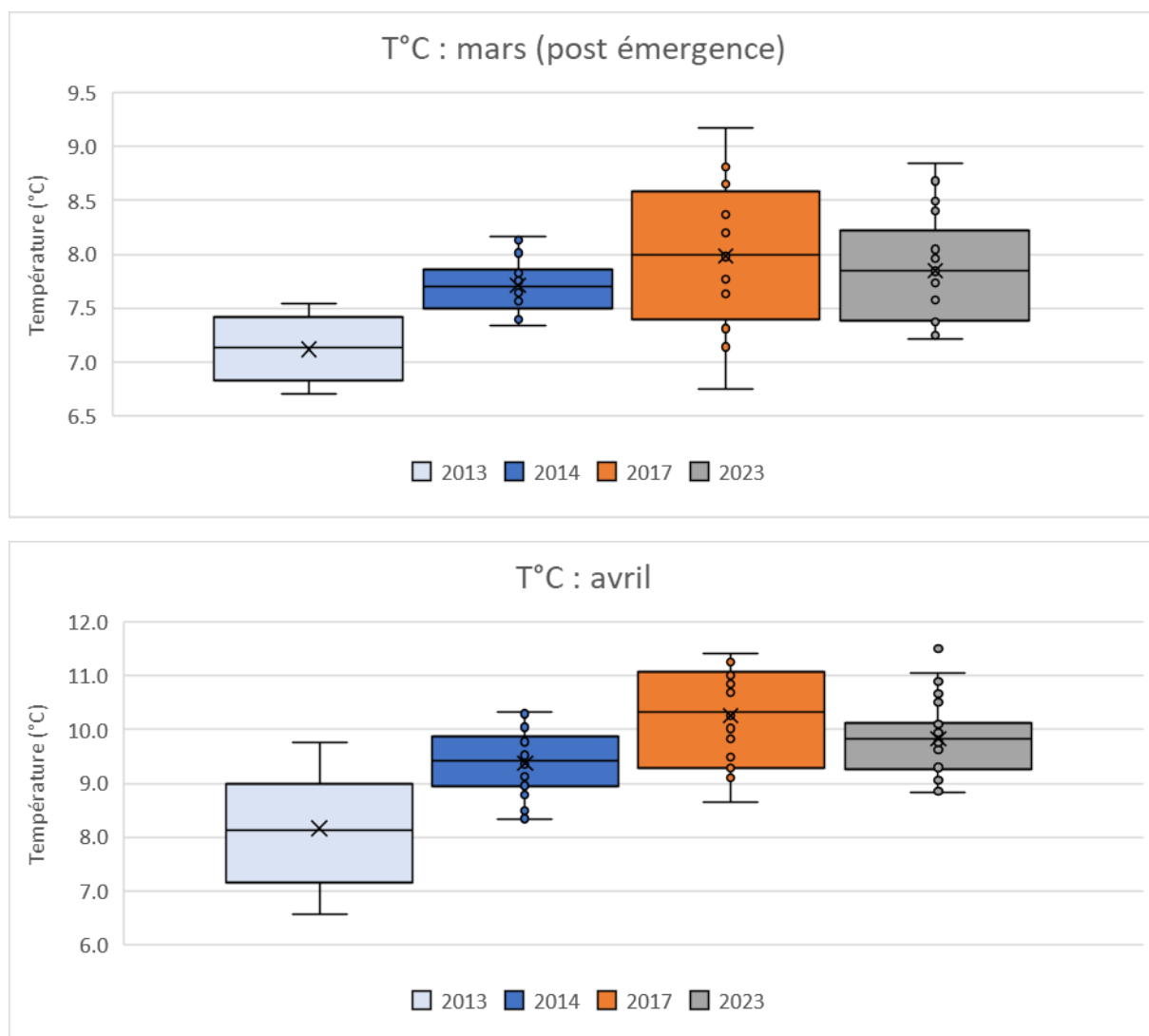


Figure 47 : Distribution des températures moyennes journalières des mois concernés par l'émergence de la truite (mars-avril)

Le schéma des quatre années est très similaire entre mars et avril. Le mois de mars 2013 est cependant nettement plus froid. Mars 2017 est certes plus doux mais présente aussi la plus forte amplitude thermique avec notamment des températures minimales aussi froides qu'en 2013.

Dans l'étude de Jensen & Johnsen (1999), la gamme de température à l'émergence s'étend de 6 à 10.8°C avec une moyenne à 8.2°C. Le mois de mars 2013 se détache nettement par le bas (Figure 47) et se place plutôt dans la partie basse de cette gamme. Les températures à l'émergence de 2013 ont pu donc éventuellement participer au mauvais recrutement, bien qu'elles restent dans la gamme de l'étude.

8.4.4.3 Focus sur les températures estivales

L'autre période de sensibilité en matière de température d'eau pour la truite est la saison estivale où la chaleur peut mettre à mal la survie des individus, particulièrement les juvéniles. Une réduction significative de la quantité d'alevins est observée lorsque la température moyenne des trente jours consécutifs les plus chauds atteint 17.5-18°C (Baran et al., 1999; Elliott & Elliott, 1995). Cela s'explique par le rendement énergétique qui devient défavorable : l'effort qu'implique la capture d'une proie est

supérieur à l'énergie apportée par la consommation de celle-ci. Les truitelles finissent donc par s'amaigrir, s'affaiblir puis mourir. On a vu avec le Tableau 9 que **la station de Mespoulet-bas était déjà limitante s'agissant des températures pour les juvéniles de truite. Seulement deux années sans crue sont favorables sur ce critère, les deux années de meilleur recrutement.** 2013 ne dépasse le seuil que de 0.1°C et n'est pas à mettre dans le même panier que 2023, bien plus chaude. En se référant aux valeurs sur sept jours qui traduisent plutôt les épisodes de canicule qui peuvent se produire sur de plus courtes périodes, plus aucune année n'est favorable au regard des seuils de la littérature scientifique (Tableau 9). L'écart avec l'optimum maximal reste toutefois inférieur à 1°C en 2014 et 2017. **La température a donc certainement joué un rôle dans l'amoindrissement du nombre d'alevins en 2023 où le seuil de 17.5-18°C de T30Jmax est dépassé.**

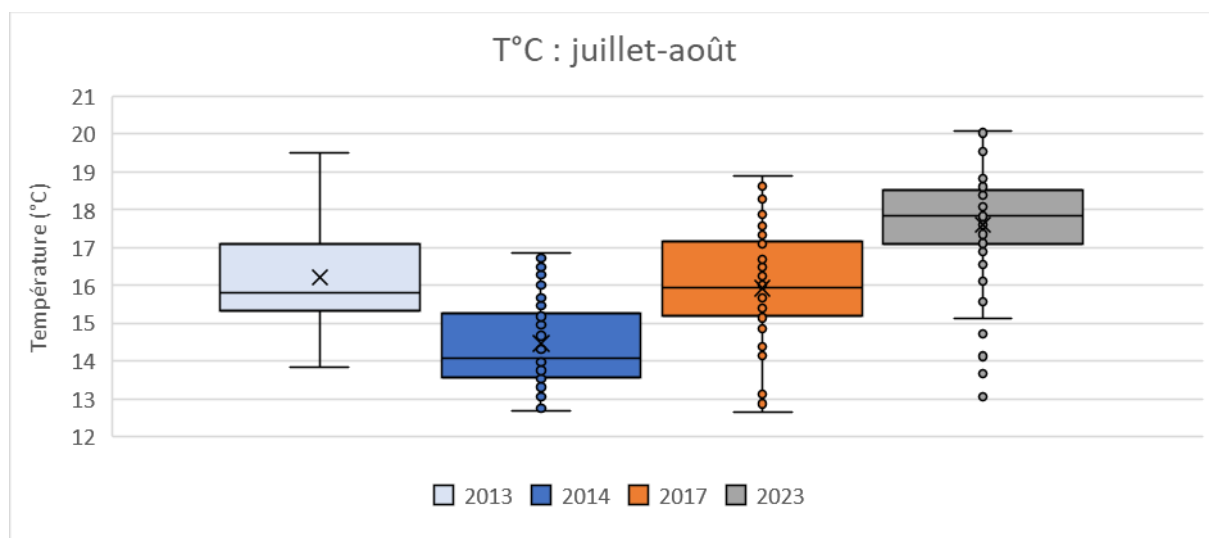


Figure 48 : Distribution des températures moyennes journalières des deux mois les plus chauds (juillet-août)

Effectivement comme on l'a déjà montré, l'été 2023 a été particulièrement chaud, bien plus que celui de 2013, qui pourtant franchit aussi le seuil des 17°C en température moyenne maximale des trente jours consécutifs les plus chauds.

Le box-plot de la figure ci-dessus rapproche 2013 de 2017 et on peut donc penser que le facteur thermie n'a pas significativement joué dans l'amoindrissement du stock d'alevins en 2013 puisque la distribution des températures est très proche de celle de 2017 qui montre le recrutement maximal de la chronique de suivi.

2014 est l'année la plus fraîche en été. Certes elle dépasse les 17°C (en juin) mais sur un nombre de jours très réduit par rapport aux autres années, après quoi elle ne redépasse plus ce seuil ni en juillet ni les mois suivants en considérant les moyennes journalières et seulement subrepticement en température horaire (17.3°C en juillet).

Tableau 20 : Températures moyennes journalières maximales à Mespoulet-bas

	Tmax			
Mois	2013	2014	2017	2023
Juin	14.1	17.5	18.8	15.5
Juil	19.5	16.9	17.7	19.0
Août	17.5	15.8	18.9	20.1
Sept	15.7	16.0	16.6	17.5

Le seuil de létalité significative (c'est-à-dire la température que les individus ne peuvent tolérer pendant une courte période – 10 minutes est généralement la durée standard) reconnu pour les juvéniles de truite est 25°C, mais les mortalités peuvent débuter à partir de 22°C (Elliot, 1981; Elliott & Elliott, 1995). Les 25°C ne sont pas franchis, il y a même une marge de 4.9°C par rapport au record de température rencontré sur ces quatre années (20.1°C en août 2023 en moyenne journalière, et 21°C en température horaire). Ce n'est pas pour autant que l'effet sur les truitelles est nul, en août 2023, le maximum reste 3°C au-dessus de l'optimum, ce n'est donc pas négligeable.

Pour résumer, globalement la thermie a été favorable pour les bonnes années de recrutement (tout particulièrement en 2014) contrairement à 2013 et 2023, et ce pour des raisons différentes. En 2013, ce sont les basses températures à l'émergence qui ont pu affecter négativement le cheptel d'alevins tandis que ce sont les fortes températures estivales, aussi bien en intensité qu'en durée, qui ont certainement joué un rôle dans la diminution du nombre de truitelles en 2023.

8.5 Synthèse des paramètres gouvernant le plus le recrutement en truites sur la Cère en aval de Brugale et discussion

Nous pouvons ressortir de cette analyse plusieurs éléments de réponse. Il semble que ce soit surtout l'hydrologie printanière abondante qui ait primé sur le nombre d'éclusées dans le mauvais recrutement de 2013 et 2023, le risque de piégeage-échouage ayant été réduit par de forts débits après baisse et des amplitudes plus faibles qu'en 2017. A contrario, c'est le phénomène de dérive forcée qui a dû être renforcé lors de ces deux années par l'hydrologie printanière soutenue et les éclusées post émergence plus fréquentes augmentant l'instabilité hydrologique.

Les mauvaises années se signalent par : une hydrologie printanière soutenue ; un nombre de baisses d'éclusées post émergence pratiquement deux fois supérieur par rapport aux bonnes années ; et une thermie à l'émergence ou estivale limitante.

L'année 2014 est, à première vue, plus favorable en tout point par rapport à 2017. Les éclusées sont moins nombreuses et moins intenses quel que soit le critère, de même pour la thermie qui est similaire à l'émergence et plus fraîche l'été. Les régimes hydrologiques post émergence ne semblent pas non plus meilleurs en 2017. Pourtant le recrutement est bien meilleur en 2017. Le seul paramètre susceptible d'expliquer cette différence est le débit après baisse bien inférieur en 2014, qui a pu induire plus de piégeage-échouage est ainsi amoindrir le stock de juvéniles en fin d'été malgré les conditions hydrologiques et thermiques favorables.

Il se trouve que parmi les années sans crue, les deux années qui sortent du lot niveau recrutement sont à la fois les seules dont la thermie estivale est favorable, ce qui interroge sur le poids de la variable « thermie » par rapport aux éclusées et à l'hydraulique printanière.

Le recrutement semble donc être défavorisé par :

- **les fortes quantités d'eau à partir du début d'émergence jusqu'en fin de P3 (30/06),**
- **les baisses d'éclusées et plus précisément une fréquence élevée des baisses post émergence jusqu'en fin de P3 (30/06),**
- **la thermie en dehors du préférendum biologique chez les juvéniles de truite.**

9. Perspectives et proposition de mesures de mitigation au niveau du barrage de Brugale

9.1 Synthèse de la situation et des impacts des aménagements

Le bassin de la Cère est fortement aménagé d'un point de vue hydroélectricité. Nous nous trouvons donc dans un contexte artificiel et nous avons pu montrer que c'était certainement aussi le cas de la population de truite, compte tenu de la typologie théorique associée à ce type de milieu. **Attention, cela ne veut pas dire qu'il n'y aurait pas de truite en l'absence des aménagements de la Cère mais qu'elle serait a minima en effectif moindre sur les 3-4 km en aval de Brugale.**

Certaines caractéristiques et modalités de gestion de la chaîne d'aménagements agissent indirectement en la faveur du peuplement de truite en aval de Brugale, tandis que d'autres agissent de façon négative. Il est important de rappeler l'enjeu de préservation de cette espèce protégée en aval des grands barrages qui peuvent faire tampon au réchauffement de l'eau et à la diminution de la ressource en période d'étiage. Les cours d'eau du Massif Central, du fait du changement climatique, reçoivent de moins en moins de précipitations sous forme de neige et connaissent un réchauffement de leurs eaux mettant en péril les populations naturelles de truite sur une grande partie du réseau hydrographique. Il y a un **enjeu fort à adapter la gestion des débits à l'aval des grands aménagements hydroélectriques** pour préserver les populations présentes.

Impacts négatifs de la chaîne d'aménagements hydroélectriques sur l'hydrosystème :

- Les nombreuses retenues érigées sur le bassin de la Cère sont responsables de l'enneigement d'une quinzaine de kilomètres de tronçons naturels salmonicoles (hors Brugale) : Brugale – 2 km, Nèpes – 2 km, Saint Etienne-Cantalès – 10 km, Candes – 1 km. Ce linéaire de zone à truite n'est donc pas compensé par la nouvelle zone créée en aval de Brugale (3-4 km). A cela s'ajoutent les 25 km de gorges en débit réservé (tronçons court-circuités, l'essentiel de l'eau ne passe plus dans la rivière mais dans des « tuyaux ») ainsi que les quelques affluents également court-circuités (Escaumels court-circuité sur 4 km, ruisseau de Candes sur 2.5 km).

- La série de retenues bloque le transit sédimentaire ce qui empêche l'apport de nouveaux matériaux, dont la fraction granulométrique exploitée par les géniteurs. Aujourd'hui, les frayères de la Cère aval sont en réalité des frayères fossiles, des reliquats hérités de l'activité hydro-sédimentaire avant barrages (Boutault, 2023). L'incapacité de ré-engraissement des radiers fait que les frayères qui s'y trouvent ne sont pas de qualité optimale. En effet, elles présentent une granulométrie très voire trop grossière pour les géniteurs de salmonidés de petite taille, les gros sédiments étant les seuls à pouvoir résister aux crues. A terme, avec les phénomènes d'incision et de pavage inhérents au déficit sédimentaire, les faciès favorables en matière de substrat et donc d'habitat sont voués à disparaître ou du moins réduire en surface et en qualité, laissant place à de la dalle ou des faciès pavés peu accueillants aussi bien pour la vie en eau libre des jeunes poissons que pour la reproduction des géniteurs.

- Tout comme les sédiments, les poissons sont bloqués et ne peuvent plus accomplir leur migration pour assurer leur cycle de vie, pénalisant ainsi la recherche d'habitats favorables, de refuges thermiques (pour passer la période estivale) ou de zones de frai par exemple. Or, dans le cas de la Cère aval Brugale cela serait très utile, compte tenu notamment du régime thermique déjà limitant pour les juvéniles certaines années.

Il existe certes quelques points positifs pour une population de truite sur 3-4 km en aval du barrage...

- La stratification thermique de la vaste retenue de St-Etienne-Cantalès entraîne un refroidissement du régime thermique estival de la Cère. Cela maintient de façon artificielle une zone à truite en aval de Brugale. De plus, la cinétique de réchauffement de l'eau et donc de glissement typologique se voit réduite ce qui d'un point de vue conservation de secteurs salmonicoles sur le long terme est intéressant.

- Les retenues successives, et par-dessus tout celle de St-Etienne-Cantalès, protègent les frayères des crues en réduisant nettement leur intensité et leur fréquence (écrêtement des crues). Pour illustrer, six années sur douze ont été épargnées par la crue biennale en régime influencé alors qu'en ANR, onze années sur douze auraient connu une crue à minima supérieure à 136 m³/s.

... mais même là, l'écêtement des crues s'accompagne d'effets négatifs :

- De plus, bien qu'il y ait un certain écrêtement des crues, l'eau doit tout de même finir par passer à un moment ou à un autre. Cela entraîne par conséquent un allongement de la durée dans les forts débits ce qui là encore nuit aux jeunes stades de truite, pas encore taillés pour résister à de telles vitesses.

- Le fonctionnement de l'aménagement de Brugale génère des éclusées qui, comme nous avons pu le démontrer, nuisent au recrutement des truites (exondation des frayères, piégeage-échouage et dérive forcée des alevins).

9.2 Proposition de mesures de mitigation

A partir de là, comment réduire l'impact de l'aménagement de Brugale pour favoriser la population de truites ? Le barrage de Brugale, de par sa conception actuelle, ne permet pas de faire transiter les matériaux provenant de l'amont (Boutault, 2023). Il n'est donc pas possible de rétablir le transit sédimentaire, tout du moins sans travaux conséquents sur l'édifice en lui-même. En revanche, on peut envisager des opérations de restauration et d'entretien des frayères existantes afin d'améliorer leur fonctionnalité. Cela dit, l'amélioration de la situation vis-à-vis des éclusées reste la priorité. Autrement, on aura beau augmenter le nombre d'alevins produits, si le régime d'éclusées reste le même, la situation risque fort de ne pas s'améliorer (les alevins produits continuant à se faire piéger-échouer ou à dériver). La marge de manœuvre se cantonne donc surtout à la gestion du régime d'éclusées en vue de réduire le niveau de perturbation hydrologique. La Convention éclusées constitue un bon support pour s'inspirer de mesures déjà implémentées sur des cours d'eau voisins (Dordogne et Maronne) tout à fait transposables au bassin de la Cère et dont les bénéfices ont déjà été prouvés.

Note : les valeurs seuil qui seront proposées sont calées en fonction des possibilités d'ajustement des groupes de turbinage (sept groupes de 7 m³/s dont pouvant fonctionner à 3.5 m³/s) ce qui implique l'adaptation des seuils que laissent apparaître nos données.

- 1) Fréquence des baisses d'éclusées en post émergence : **fixation d'un quota de 20 baisses maximum entre le 01/03 et le 30/06.**

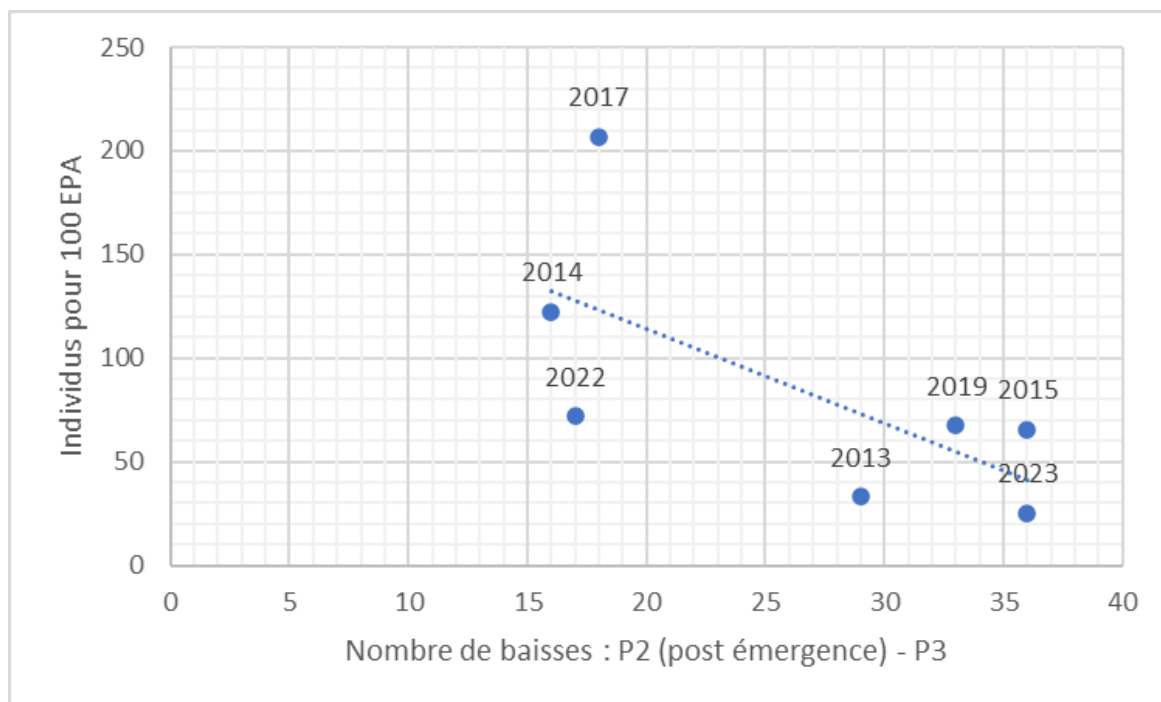


Figure 49 : Relation entre le nombre de baisses en P2 (post émergence théorique) - P3 et le nombre d'alevins de truite, années sans crue

La fréquence des baisses est apparue comme le paramètre du régime d'éclusées le plus structurant des bonnes et mauvaises années. Au-delà de 18 baisses d'éclusées, le recrutement est au mieux moyen. L'émergence théorique pouvant débiter au 01/03 (2020), on pourrait donc envisager l'instauration d'un quota de vingt baisses maximum couvrant la période d'émergence et de post émergence des alevins, du 01/03 au 30/06 (P2-P3). Cela équivaut à environ une baisse par semaine.

- 2) Débit maximum post émergence : **35 m³/s du 01/03 au 31/03 puis 24.5 m³/s du 01/04 au 30/06.**

On a montré qu'entre 1 fois et 1.5 fois le module en P2-P3 le recrutement était pénalisé (8.4.1.3). C'est particulièrement visible quand on regarde les hydrogrammes, les deux bonnes années ne dépassent guère le module après la date théorique de début d'émergence et sont parfois bien en dessous sur de longues périodes (Figure 35). On peut donc fixer à environ 1 fois le module le débit maximum, soit 24.5 m³/s (trois groupes de 7 m³/s plus le groupe de 3.5 m³/s). De plus, cette mesure a déjà fait ses preuves puisque l'instauration d'un débit maximum sur la Dordogne (1.8 fois le module à Argentat) a permis la multiplication par six des abondances en alevins de truite en aval du barrage du Sablier (Ladoux, 2021).

D'un point de vue faisabilité et respect du seuil de 24.5 m³/s, il s'avère qu'il est difficile de respecter cette mesure le mois de mars, le débit moyen étant inférieur à ce seuil seulement 28% des années depuis 1994 (12.5). On peut donc viser le second seuil alternatif mis en évidence comme structurant du recrutement en truitelles, une fois et demi le module (35.85 m³/s), soit d'un point de vue pratique sept groupes – 35 m³/s (débit moyen interannuel en mars non dépassé 62%). Si l'on considère les six dernières années (2019-2024), cette mesure peut être tenue quatre années sur six (12.6), ce qui déjà permettrait d'améliorer la situation sur la durée, le mois de mars étant celui où débute l'émergence et durant lequel les alevins de truite sont le plus sensible aux forts débits.

- 3) Gradients maximaux post émergence : **7 m³/s/h à la baisse du 01/03 au 15/05 et 17.5 à la hausse du 01/03 au 15/05.**

Ladoux (2021) a montré que le seuil probable d'impact des gradients de baisse était de 20% du module par heure, soit environ 5 m³/s/h à Brugale. On constate effectivement sur la Figure 44 que le gradient de baisse médian de 2017 vaut 5 m³/s/h en P2, gradient médian le plus favorable des quatre années, pour un troisième quartile à environ 8 m³/s/h qui n'a donc pas pénalisé le recrutement. En P3 toutefois, on a vu que ce paramètre avait moins d'influence avec des gradients plus importants 2017 (17.5 m³/s/h). On pourrait donc fixer à 7 m³/s/h le gradient de baisse maximum en période de post émergence (1^{er} mars au 15 mai).

Pour les hausses, nous n'avons pas détecté de gradients pénalisants dans la limite de 17-18 m³/s/h. On peut donc proposer par principe de précaution un gradient de hausse maximum de 17.5 m³/s/h.

Proposer un débit minimum post émergence à respecter, à l'image de ce qu'a été fait sur la Maronne et la Dordogne, aurait été la bienvenue mais il est difficile de le faire rigoureusement puisque la station de Mespoulet-bas n'a pas été modélisée. On ne peut donc pas croiser les données de débit avec des notions de degré de mise en eau des frayères, des habitats de croissance et des zones de piégeage. C'est pourtant une mesure pertinente au vu des bénéfices acquis sur la Maronne où l'abondance en alevins de truite a été multipliée par trois en aval du barrage de HautePAGE, essentiellement grâce au relèvement des débits minimaux (Ladoux, 2021). On notera juste ici, qu'avec un premier quartile des débits après baisses entre 10 et 15 m³/s en P2 et P3, on peut obtenir quand même un très bon recrutement en fin d'été.

9.3 Objectifs hydrologiques et biologiques

En réponse à cette diminution attendue du niveau de perturbation hydrologique (l'indice de perturbation hydrologique de Courret (2014) devra être calculé à l'échelle des périodes biologiques ; on peut penser qu'au maximum en P2 et P3, il faudra rester à l'indice 1 perturbation hydrologique simplement « sensible »), des objectifs biologiques au regard de la quantité de truitelles peuvent être proposés. Le but de l'encadrement de la gestion par éclusées est dans notre cas de conserver un niveau de recrutement en truite plus ou moins conforme à ce qu'on pourrait attendre d'un cours d'eau de ce niveau typologique.

La Dordogne à Brivezac (entre Argentat et Beaulieu-sur-Dordogne) est comparable typologiquement à la Cère à Mespoulet-bas et connaît une perturbation hydrologique bien moindre, pratiquement nulle pendant les périodes sensibles pour les alevins (Tableau 7 – Tableau 21). Elle constitue donc une référence pertinente de ce que l'on pourrait attendre comme quantité d'alevins en aval de Brugale.

Tableau 21 : Résultats de l'indicateur éclusées par période sur la Dordogne à Brivezac

Dordogne (Brivezac)						
Année	P1	P2	P3	P4	P5	P6
2012	3-	0	0	0	0	1
2013	3-	0	0	0	1	3-
2014	1	0	0	1	1	3+
2015	3-	1	0	0	1	2-
2016	1	0	0	1	1	2+
2017	2+	1	0	1	2-	3+
2018	0	0	0	1	1	2+
2019	2+	0	0	0	1	2-
2020	3+	0	0	0	2+	3-

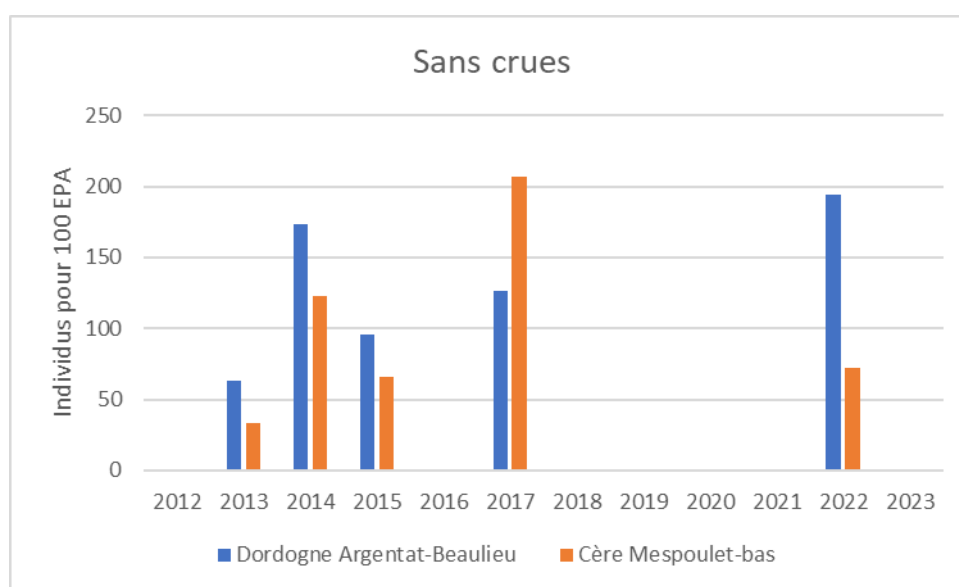


Figure 50 : Comparaison des abondances en truitelles de la Dordogne et de la Cère – années sans crue aux deux stations hydrométriques : Brivezac et Brugale

La moyenne sur la chronique 2012-2023 sans compter les années à crue est de 130 truitelles pour 100 EPA sur la Dordogne contre 100 sur la Cère, soit une réduction du potentiel d'environ 23%.

On voit que 2017 s'apparente au potentiel maximum pouvant être atteint sur la Cère et que d'autres années auraient pu fournir plus d'alevins sans l'intensité du régime d'éclusées de la Cère comme 2014, 2015 mais surtout 2022 où pour le coup l'écart est très net avec les résultats de la Dordogne.

Nous sommes donc en droit d'attendre **130 truitelles pour 100 posés d'anode** à Mespoulet-bas les années sans crue. Se rapprocher de cette valeur cible de façon pérenne attesterait de l'efficacité et de l'intérêt biologique des mesures de mitigation mises en place.

10. Résumé

Les aménagements hydroélectriques ont modifié profondément le cours de la Cère, et de fait les conditions de vie du compartiment ichtyologique. Quand bien même ils favorisent le développement d'une population salmonicole à leur aval en délivrant de l'eau froide et écrétant les crues à l'émergence, ils compromettent ensuite le développement des truites sur plusieurs aspects (reproduction, survie des alevins, qualité de l'habitat, etc.) de par le fonctionnement par éclusées de l'aménagement de Brugale. Les perturbations générées par le régime d'éclusées réduisent le recrutement en truite et ainsi affaiblissent la population dans son ensemble.

La perturbation hydrologique présente une grande variabilité selon les années et à l'échelle infra-annuelle. Ce sont les périodes hivernales et automnales qui montrent le plus d'éclusées. Ce sont aussi les périodes les plus stratégiques pour cette production énergétique. Ce sont par contre les éclusées printanières, moins stratégiques, qui pénalisent le plus les alevins de truite.

Dans le triptyque hydrologie globale – éclusées – thermie, il apparaît difficile de cerner celui dont l'impact sur le recrutement est le plus fort. Les crues semblent faire plafonner le recrutement autour de 50 truitelles pour 100 EPA sur la Cère à Mespoulet Bas, mais les éclusées les années sans crue sont aussi capables de « raboter » le recrutement de la même façon. Le rôle de la thermie, certain, reste difficile à évaluer du fait de l'absence pour l'instant, dans la chronique, d'année sans crue à hydrologie et éclusées printanières favorables au recrutement mais à thermie estivale défavorable aux jeunes truites.

On voit bien que lorsque les planètes s'alignent au niveau des trois grands compartiments (hydrologie, éclusées, thermie), on peut obtenir des recrutements tout à fait satisfaisants voire excellents (2017 avec deux truites par posé, sachant qu'une c'est déjà bien).

Au vu des enjeux de préservation de l'espèce, on peut proposer trois mesures de mitigation qui devraient permettre d'atteindre de tels niveaux de recrutement de façon plus fréquente, sous réserve d'une hydrologie printanière et d'une thermie favorables :

- Fixation d'un quota de **20 baisses maximum entre le 01/03 et le 30/06.**
- Débit maximum post émergence : **35 m³/s du 01/03 au 31/03 puis 24.5 m³/s du 01/04 au 30/06.**
- Gradients maximaux post émergence : **7 m³/s/h à la baisse du 01/03 au 15/05 et 17.5 m³/s/h à la hausse du 01/03 au 15/05.**

Grâce à ces mesures, est attendu une réduction du niveau de perturbation hydrologique en P2-P3 et ainsi une amélioration du recrutement, tendant vers 1.3 truite par posé de façon plus régulière (atteint pour l'heure **seulement deux années sur douze !**).

La Cère est un cours d'eau large et bénéficie d'un potentiel d'accueil intéressant pour la truite et l'ichtyofaune de manière générale. Accroître la production en alevins de manière régulière permettrait de saturer plus facilement la capacité d'accueil offerte par la rivière.

Cela passe inévitablement par une mitigation des éclusées, qui présentent aujourd'hui encore un régime trop intense. C'est un levier essentiel pour améliorer la situation (on aura beau améliorer l'état des frayères et leur nombre, si le régime d'éclusées reste le même, le recrutement en truitelles en fin d'été risque fort de ne pas s'améliorer en quantité et régularité).

11. Bibliographie

- Arevalo, E., Maire, A., Tétard, S., Prévost, E., Lange, F., Marchand, F., Josset, Q., & Drouineau, H. (2021). Does global change increase the risk of maladaptation of Atlantic salmon migration through joint modifications of river temperature and discharge? *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1964), 20211882. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1882>
- Baran, P. (2023). *Guide technique du SDAGE : ECLUSEES HYDROELECTRIQUES DU DIAGNOSTIC DE FONCTIONNEMENT AUX MESURES D'ATTENUATION VERSION DE TRAVAIL 22/09/2023 — Bassin Rhône Méditerranée.*
- Baran, P., Delacoste, M., Lascaux, J. M., & Lagarrigue, T. (1999). *Étude de l'habitat de la truite commune (Salmo trutta, L.) dans quatre cours d'eau à haute valeur patrimoniale de la Loire.* ENSAT/FDPPMA42, FEOGA, Agence de l'eau Loire Bretagne, CSP, Conseil Général de la Loire.
- Baran, P., Gouraud, V., Bergerot, B., & Tissot, L. (2014). *Relationship between hydrology and recruitment of brown trout populations in mountain streams.* 10th International symposium on ecohydraulics, Trondheim, Norway, June 23 – 27.
- Bauersfeld, K. (1976). *Stranding of juvenile salmon by flow reductions at Mayfield Dam on the Cowlitz River.* State of Washington, Department of Fisheries.
- Baumann, P., & Klaus, I. (2003). *Impact de l'exploitation par éclusées sur l'écologie des cours d'eau. Résultats d'une étude bibliographique.* Office fédéral des forêts et du paysage (OFEP), Berne, Switzerland.
- Bejarano, M. D., Sordo-Ward, Á., Alonso, C., & Nilsson, C. (2017). Characterizing effects of hydropower plants on sub-daily flow regimes. *Journal of Hydrology*, 550, 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.023>
- Belliard, J., Ditché, J.M., Roset, N., & Dembski, S. (2012). *GUIDE PRATIQUE DE MISE EN ŒUVRE DES OPERATIONS DE PECHE A L'ELECTRICITE.*

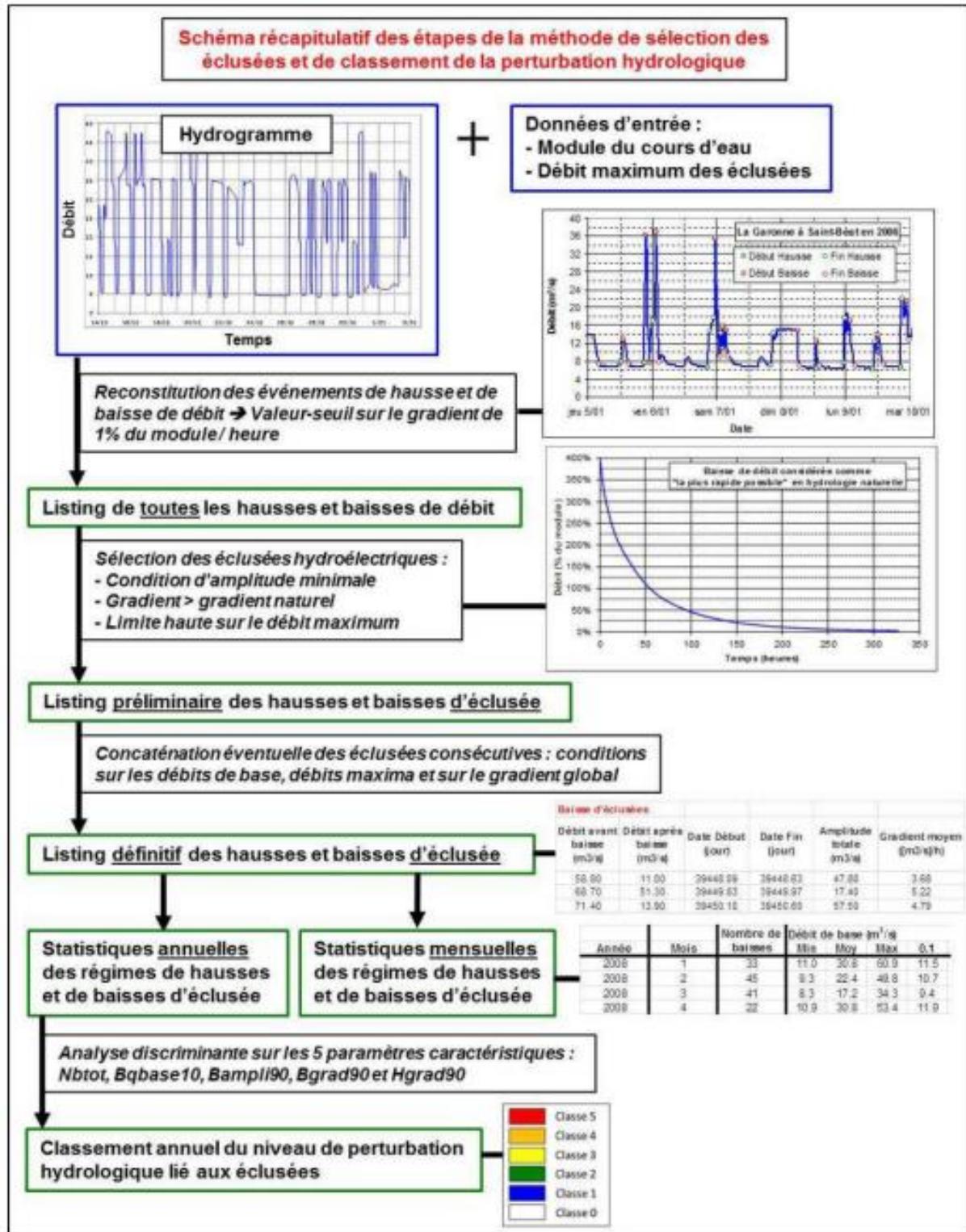
- Bergerot, B., & Cattaneo, F. (2017). Hydrological drivers of brown trout population dynamics in France. *Ecohydrology*, 10(1), e1765. <https://doi.org/10.1002/eco.1765>
- Boavida, I., Santos, J., Ferreira, M., & Pinheiro, A. (2013). *Fish habitat response to hydropеaking*. IAHR World Congress.
- Boutault, F. (2023). *EXPERTISE BIO-HYDROMORPHOLOGIQUE SUR LA RIVIERE CERE EN AVAL DU BARRAGE DE BRUGALE ET RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE D'UNE GESTION HYDROSEDIMENTAIRE*. ECOGEA, EPIDOR.
- Bradford, M. J., Allan, J. A., Higgins, P. S., & Taylor, G. C. (1995). *An Experimental Study of the Stranding of Juvenile Coho Salmon and Rainbow Trout during Rapid Flow Decreases under Winter Conditions*. North American Journal of Fisheries Management.
- Bret, V., Bergerot, B., Capra, H., Gouraud, V., & Lamouroux, N. (2016). Influence of discharge, hydraulics, water temperature, and dispersal on density synchrony in brown trout populations (*Salmo trutta*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 73(3), 319-329. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0209>
- Capra, H. (1998). *Histoire d'habitat. Relations quantitatives entre la dynamique des populations de truite commune et la variabilité temporelle de l'habitat. Vers une meilleure connaissance des habitats structurants*. 1998/2, EDF-DTG/Cemagref.
- Cazeneuve, L., & Kardacz, J. (2015). *SUIVI DE LA DERIVE DES ALEVINS DE SALMONIDES SUR LA MARONNE A L'AVANT DE L'USINE DE HAUTEFAGE*.
- Comité de rivière Cère, & EPIDOR. (2000). *Atlas cartographique—Contrat de rivière Cère 2000*.
- Courret, D. (2014). *Caractérisation de la perturbation hydrologique induite par les régimes d'éclusées hydroélectriques et définition d'un indicateur. Réflexion sur les mesures de mitigation des impacts des éclusées sur les populations de poissons*.
- Courret, D., Chanseau, M., Lascaux, J.-M., & Larinier, M. (2012). Impacts écologiques des éclusées hydroélectriques. Caractérisation des régimes d'éclusées et Retour d'expérience sur la Maronne. *La Houille Blanche*, 98(1), 8-14. <https://doi.org/10.1051/lhb/2012001>

- Degiorgi, F., & Raymond, J. C. (2000). *Guide technique : Utilisation de l'ichtyofaune pour la détermination de la qualité globale des écosystèmes d'eau courante.*
- ECOGEA. (2024). *Synthèse de l'impact des éclusées sur le Lot à l'aval du barrage de Castelnau et pistes d'amélioration pour les peuplements piscicoles.*
- Elliott, J. M. (1981). *Elliott, J.M. (1981). Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts.*
- Elliott, J. M., & Elliott, J. A. (1995). The effect of the rate of temperature increase on the critical thermal maximum for parr of Atlantic salmon and brown trout. *Journal of Fish Biology*, 47(5), 917-919.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1995.tb06014.x>
- Fédération du Tarn pour la Pêche & et la Protection du Milieu Aquatique. (2020). *Détermination des Niveaux Typologiques Théoriques des cours d'eau du Tarn.*
- Ferguson, R. G. (1958). The Preferred Temperature of Fish and their Midsummer Distribution in Temperate Lakes and Streams. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 15(4), 607-624. <https://doi.org/10.1139/f58-032>
- Hayes, J., Olsen, D., & Hay, J. (2010). The influence of natural variation in discharge on juvenile brown trout population dynamics in a nursery tributary of the Motueka River, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 44(4), 247-269.
<https://doi.org/10.1080/00288330.2010.509905>
- Hessevik, T. (2002). *Stranding and behaviour of wild juvenile brown trout (Salmo trutta) and Atlantic salmon (Salmo salar) during rapid flow decreases in an artificial stream channel.* Department of Biology and Nature Conservation, Norwegian Agricultural University.
- Hoffarth, P. (2004). *Evaluation of Juvenile Fall Chinook Salmon Entrapment in the Hanford Reach of the Columbia River.* Washington Department of Fish and Wildlife.
- Jensen, A. J., & Johnsen, B. O. (1999). The functional relationship between peak spring floods and survival and growth of juvenile Atlantic Salmon (*Salmo salar*) and Brown Trout (*Salmo trutta*). *Functional Ecology*, 13(6), 778-785. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00358.x>

- Ladoux, P. (2021). *Analyse de l'influence des éclusées sur le recrutement en 0+ des salmonidés du bassin de la Dordogne au cours des 20 dernières années.*
- Neitzel, D. A., & Becker, C. D. (1985). *Tolerance of Eggs, Embryos, and Alevins of Chinook Salmon to Temperature Changes and Reduced Humidity in Dewatered Redds.* Transactions of the American Fisheries Society.
- Nicola, G. G., Almodóvar, A., & Elvira, B. (2009). Influence of hydrologic attributes on brown trout recruitment in low-latitude range margins. *Oecologia*, 160(3), 515-524.
<https://doi.org/10.1007/s00442-009-1317-x>
- O'Briain, R. (2019). Climate change and European rivers: An eco-hydromorphological perspective. *Ecohydrology*, 12(5), e2099. <https://doi.org/10.1002/eco.2099>
- OFB, & INRAE. (2022). *La pêche scientifique à l'électricité dans les milieux aquatiques continentaux.* Office français de la biodiversité.
- Schmutz, S., Bakken, T. H., Friedrich, T., Greimel, F., Harby, A., Jungwirth, M., Melcher, A., Unfer, G., & Zeiringer, B. (2015). Response of Fish Communities to Hydrological and Morphological Alterations in Hydropeaking Rivers of Austria. *River Research and Applications*, 31(8), 919-930.
<https://doi.org/10.1002/rra.2795>

12. Annexes

12.1 Synthèse des étapes de la méthode de sélection des éclusées et de classement de la perturbation hydrologique (Courret, 2014)



12.2 Répartition longitudinale (au sens biotypologique) des abondances optimales potentielles de 40 espèces (Degiorgi & Raymond, 2000)

Niveau Typologique Théorique					1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Théorique (NTT)					1	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	21	24	27	30	28	28
Diversité spécifique optimale																					
Observée (NTI)					1	1	2	3	3	4	5	7	9	12	15	18	21	23	25	23	17
AMPL	Ordre	ESP	IS	IM																	
4	1	SDF	70	88	2	3	5	3	2	1	1										
7	2	CHA	70	91	2	3	4	5	5	4	3	3	2	2	1	1	1				
8	3	TRF	45	88	1	2	3	3	4	5	5	4	3	4	2	1	1	1	1		
7	4	LPP	75	85		0,1	1	2	3	3	4	4	5	5	4	3	2	1			
7	5	VAI	55	77			0,1	1	3	4	5	4	3	3	2	1	1	1	1		
5	6	BAM	70	88				0,1	1	1	3	5	5	4	3	1	1				
7	7	LOF	30	85				1	2	3	4	5	5	4	3	3	2	1	1	1	
6	8	OBR	70	88				0,1	1	2	3	4	5	5	4	3	2	1	1		
7	9	EPI	25	45					0,1	1	3	4	5	5	4	3	3	2	2	1	1
5	10	BLN	60	79						0,1	1	2	3	4	5	3	1	1	1		
6	11	CHE	30	38						0,1	1	3	3	3	4	4	5	3	3	2	1
6	12	GOU	45	74						0,1	1	2	3	3	4	5	5	3	3	2	1
6	13	APR	85	95							0,1	1	3	4	5	4	3	1	1		
5	14	BLE	45	75								0,1	1	3	4	5	4	2	1	1	
5	15	ANG	31	55								0,1	1	1	2	2	3	3	4	4	5
5	16	HOT	40	83									0,1	1	3	5	4	3	2	1	1
5	17	TOX	40	82									0,1	1	3	5	4	3	2	1	1
5	18	BAF	50	85									0,1	1	2	3	4	5	5	3	2
5	19	LOT	60	95									0,1	1	2	3	4	5	3	2	1
5	20	SPI	50	74									0,1	1	2	3	4	5	3	2	1
5	21	VAN	55	63									0,1	1	2	3	4	5	3	2	1
5	22	EPT	25	45										0,1	1	2	3	5	5	4	3
4	23	BOU	45	56											0,1	1	4	3	5	5	4
4	24	BRO	45	95											0,1	1	2	3	5	5	4
4	25	PER	50	76											0,1	1	2	3	5	5	4
4	26	GAR	20	46											0,1	1	2	3	4	5	4
4	27	TAN	35	51											0,1	1	2	3	4	4	5
4	28	ABL	25	56												0,1	0,1	3	4	5	4
4	29	CAR	40	54												0,1	1	2	3	5	4
4	30	PSR	15	35												0,1	1	3	4	5	4
3	31	CCO	40	84													0,1	1	3	5	4
3	32	SAN	30	73													0,1	1	3	5	4
3	33	BRB	25	71													0,1	1	3	4	4
3	34	BRE	30	74													0,1	1	3	4	4
3	35	GRE	30	54														0,1	3	5	4
3	36	PES	45	70														0,1	3	4	5
3	37	ROT	40	89														0,1	2	3	4
3	38	BBG	55	95														0,1	1	3	5
2	39	PCH	35	80															0,1	3	5
2	40	SIL	30	80																0,1	3

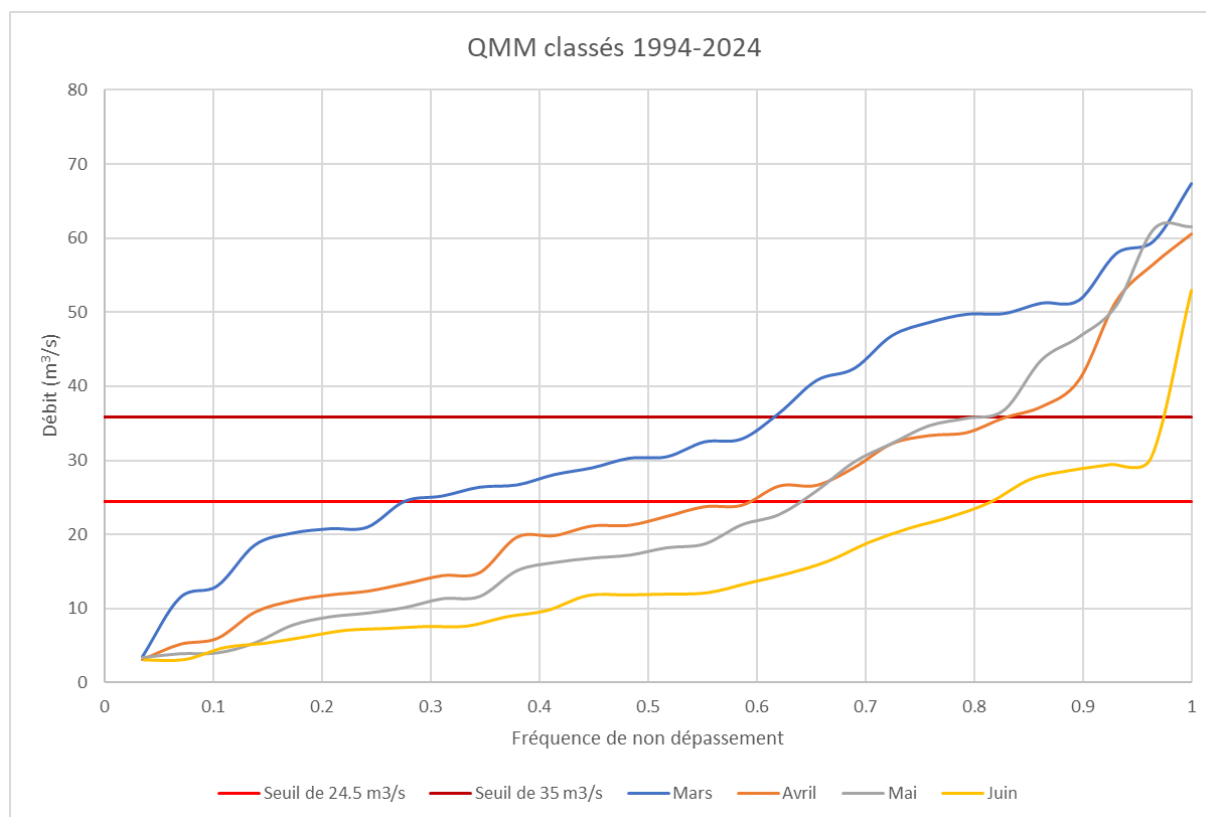
12.3 Synthèse des dates théoriques du cycle de vie de la truite – station de Mespoulet-bas (S1)

Année	Début reproduction truite à N-1 (< 10°C)	Début émergence truite
2012	28-nov	17-mars
2013	29-nov	23-mars
2014	16-nov	15-mars
2015	03-déc	17-mars
2016	17-nov	7-mars
2017	12-nov	20-mars
2018	23-nov	13-mars
2019	20-nov	12-mars
2020	15-nov	1-mars
2021	28-nov	11-mars
2022	24-nov	19-mars
2023	05-déc	11-mars
Moyenne	23-nov	13-mars

12.4 Liste des codes poissons utilisés

Code	Espèce
ABL	Ablette
ANG	Anguille
BAF	Barbeau fluviatile
BOU	Bouvière
BRG	Brème commune + Brème bordelière
BRE	Brème commune
BRB	Brème bordelière
BRO	Brochet
BOU	Bouvière
CCO	Carpe commune
CHA	Chabot
CHE	Chevesne
EPI	Epinuche
GAR	Gardon
GOU	Goujon
GRE	Grémille
LOF	Loche franche
LPM	Lamproie marine (stade larvaire)
LPP	Lamproie de Planer (stade larvaire)
OBR	Ombre commun
PER	Perche commune
PES	Perche soleil
SAN	Sandre
SAT	Saumon atlantique
TAN	Tanche
TRF	Truite Fario
VAI	Vairon
VAR	Vandoise rostrée

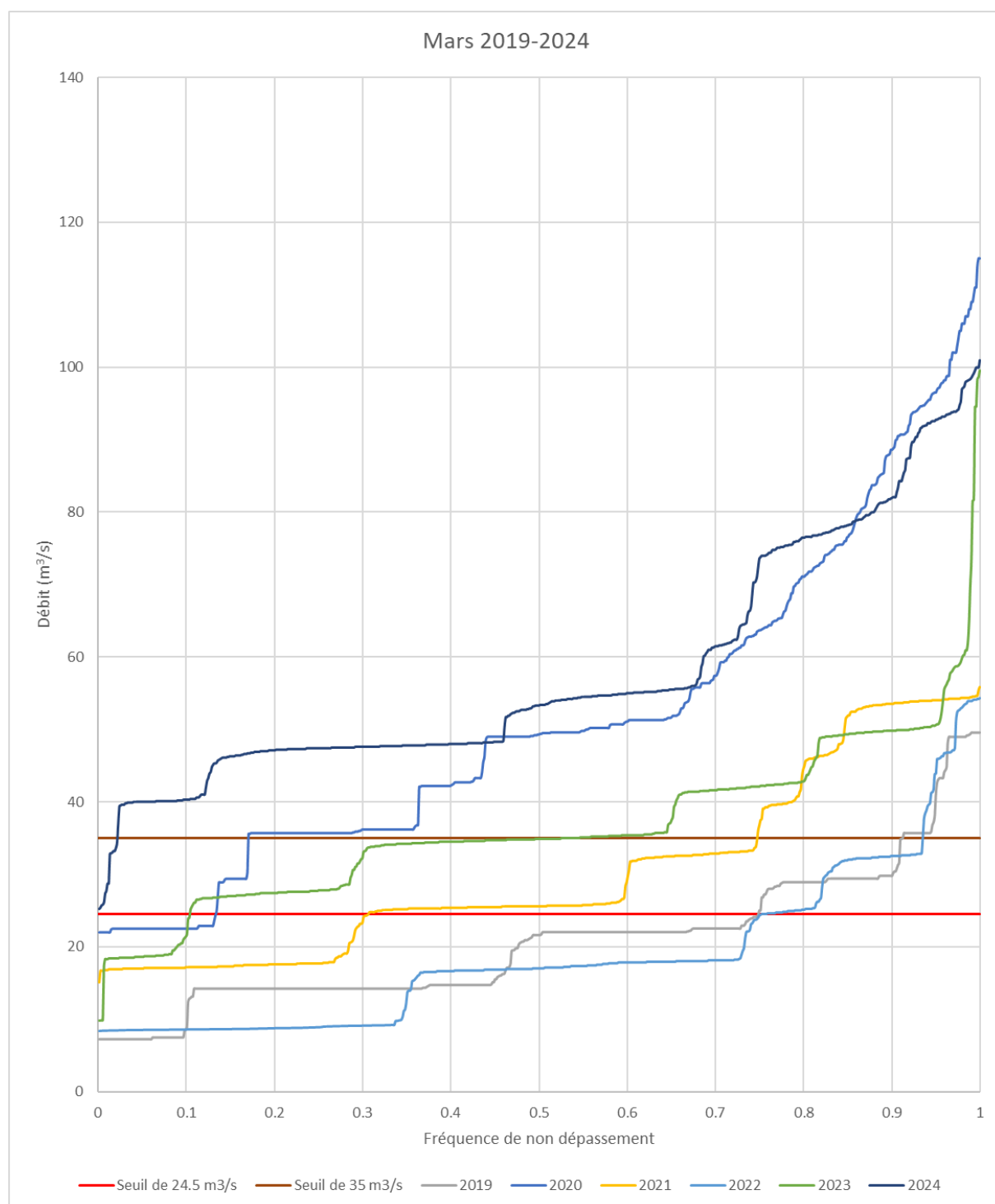
12.5 Courbes des débits moyens mensuels (mars à juin) classés de 1994 à 2024 – tableaux des fréquences de non dépassement



Fréquence de non dépassement du seuil	24.5 m³/s	35 m³/s
Mars	28%	62%
Avril	60%	82%
Mai	64%	83%
Juin	82%	97%

Débit en m ³ /s - fréquence de non dépassement	Min	0.03	0.07	0.10	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.34	0.38	0.41	0.45	0.48	0.52	0.55	0.59	0.62	0.66	0.69	0.72	0.76	0.79	0.83	0.86	0.90	0.93	0.97	1.00	Max
Mars	3.6	3.6	11.5	13.1	18.6	20.2	20.8	21.0	24.5	25.2	26.4	26.7	28.1	29.0	30.3	30.5	32.5	32.9	36.4	40.8	42.4	46.8	48.6	49.7	49.8	51.2	51.6	57.9	59.6	67.3	67.3
Avril	3.1	3.1	5.1	5.9	9.5	11.0	11.8	12.3	13.3	14.4	14.8	19.6	19.8	21.1	21.2	22.4	23.7	23.9	26.5	26.6	29.0	32.2	33.3	33.7	35.7	37.2	40.8	51.5	56.5	60.5	60.5
Mai	3.3	3.3	3.9	4.0	5.3	7.7	8.9	9.4	10.1	11.3	11.6	15.1	16.2	16.8	17.2	18.2	18.7	21.3	22.7	25.9	29.8	32.3	34.7	35.7	36.8	43.6	46.7	51.0	61.3	61.6	61.6

12.6 Courbes des débits classés au mois de mars de 2019 à 2024



Fréquence de non dépassement du seuil	24.5 m^3/s	35 m^3/s
2019	75%	91%
2020	13%	17%
2021	30%	75%
2022	75%	93%
2023	10%	55%
2024	0%	2%



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Impact des aménagements hydroélectriques sur le recrutement en truite fario de la Cère en aval du barrage de Brugale entre 2012 et 2023

Arthur Rougeyres
2023-2024

Hydroelectric development has profoundly altered the course of the Cère, and thus the living conditions of the fish community. Although they allow the development of salmonid populations downstream, by delivering cold water, they compromise brown trout development in several ways (reproduction, fry survival, habitat quality, etc.) through hydropeaking at Brugale dam.

In the triptych of global hydrology - hydropeaking – water temperature, it is difficult to determine which has the greatest impact on recruitment. Flooding seems to cap recruitment at around 50 juveniles per 100 EPA on the Cère at Mespoulet Bas, but hydropeaking in years without flooding also reduce the recruitment in the same way. The role of thermal conditions remains difficult to assess given our dataset.

We can propose three mitigation measures regarding hydropeaking at Brugale dam:

- Setting a quota of 20 decrease maximum between 01/03 and 30/06.
- Maximum post-emergence discharge: 35 m³/s from 01/03 to 31/03 then 24.5 m³/s from 01/04 to 30/06.
- Maximum post-emergence gradient: 7 m³/s/h (decrease) from 01/03 to 15/05 and 17.5 m³/s/h (increase) from 01/03 to 15/05.

Thanks to these measures, we expect a reduction in the level of hydrological disturbance in emergence and post-emergence period and thus an improvement in recruitment, tending towards a good level on a more regular basis (currently achieved in only two years out of twelve!).

Key words: brown trout -
recruitment - hydrology -
hydropeaking - water
temperature

Bureau d'études ECOGEA

352 Av. Roger Tissandié, 31600
Muret

Tuteur entreprise : Laurent Cazeneuve

Ingénieur hydrobiologiste

Tuteur académique : Catherine Boisneau