

Master 2^e Année GÉNIE ÉCOLOGIQUE

Année 2022 - 2023

Université de Poitiers

U.F.R. Sciences Fondamentales et Appliquées

40 avenue du Recteur Pineau

F-86022 Poitiers Cedex



FACULTÉ
DES SCIENCES
FONDAMENTALES
ET APPLIQUÉES
UNIVERSITÉ DE POITIERS

Alisson Bekkaï

Suivi des populations d'aloses sur le bassin versant de la Charente Suivi des pressions subies



Sous la direction de : Audrey Postic-Puivif - Chef de projet

EPTB Charente 5 rue Chante-Caille Z.I. des Charriers 17100 SAINTES

Du 27/02/2023 au 31/08/2023

Université de Poitiers

Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées

Attestation de soutenance & Appréciations du jury

Mlle /Mme /Mr ,
étudiant(e) en M2 Génie Ecologique, a soutenu ce jour le présent mémoire, devant un jury
composé d'enseignants-chercheurs et de chercheurs de l'Université de Poitiers.



Le jury, après délibération, a donné les appréciations suivantes :

❖ **Qualité générale du mémoire :**

◆ Rédaction

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

◆ Richesse du contenu

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

◆ Qualité de l'analyse

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

❖ **Qualité générale de la présentation orale :**

◆ Prestation

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

◆ Esprit de synthèse

- Excellent
- Très bon
- Bon
- Moyen
- Médiocre

◆ Qualité de l'illustration

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

❖ **Déroulement du stage (Appréciations du Maître de stage) :**

◆ Insertion dans l'équipe

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

◆ Qualité d'assimilation

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre

◆ Implication personnelle

- Excellente
- Très bonne
- Bonne
- Moyenne
- Médiocre



En conséquence, les appréciations du jury, en l'état actuel du mémoire, sont les suivantes :

- Note sur le mémoire : / 20 (coeff. 0.6) ➤ Note sur l'oral : / 20 (coeff. 0.4)
- Avis sur la divulgation du mémoire en l'état actuel :
 - Autorisée sans modification. Autorisée après modifications majeures.
 - Autorisée après modifications mineures. Non autorisée.
 - Non divulgation pour clause de confidentialité

Fait à Poitiers, le : Signature et cachet du président du Jury

Remerciements

Je profite de l'occasion qui m'est donnée ici d'exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui, de façon régulière ou ponctuelle, ont participé au suivi aloses 2023 ainsi qu'à l'élaboration de ce rapport.

J'exprime en premier lieu toute ma gratitude à Audrey Postic-Puivif, mon maître de stage, pour son écoute, son temps, ses conseils avisés et les connaissances qu'elle m'a apporté sur les poissons migrateurs. Merci de m'avoir transmis ta passion pour les aloses !

Mes remerciements vont ensuite aux autres membres de l'équipe de l'établissement pour leur accueil chaleureux, et tout particulièrement à Robin Szczepaniak et Marc-Antoine Colleu pour leurs disponibilités, leurs recommandations et leur bonne humeur toujours au rendez-vous. Je remercie aussi Léanne Jacob, pour les discussions passionnantes que nous avons pu avoir et sa relecture du mémoire.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes rencontrées au cours de cette étude, avec une pensée particulière pour les stagiaires (CMCS) Héloïse-Alison Gourcerol et Léonie Cloarec ainsi qu'à Maxime Guinée (CMCS) pour avoir donné un peu de leur temps au suivi aloses et surtout merci pour leur patience durant les (très) longues nuits aloses qu'ils ont accepté de partager quelques fois à mes côtés malgré le froid et la fatigue. Je suis aussi très heureuse d'avoir pu prendre part au suivi télémétrique de Maxime au cours duquel j'ai eu à cœur de chercher les aloses marquées.

Un grand merci à Éric Buard (CAPENA) et François Albert (MIGADO), pour m'avoir offert l'opportunité de pratiquer d'autres types de suivis. Merci d'avoir partagé avec moi vos expériences et votre passion pour les poissons migrateurs.

Merci également à Chloé Dujols (EPTB), ma colocataire de bureau, d'avoir réussi à me supporter pendant 6 longs mois sans se plaindre !

J'adresse un remerciement tout particulier au Président de l'AAPPMA de Port d'Envaux pour son œil avisé qui nous a permis de retrouver l'enregistreur volé !

Enfin, je voudrais remercier Gillou pour sa patience et le soutien indéfectible qu'il a pu m'apporter durant ce stage.

Merci à tous.

Liste des abréviations

EPTB	Établissement Public Territorial de Bassin
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
CMSC	Cellule Migrateurs Charente Seudre
OFB	Office Français de la Biodiversité
PlaGePoMi	Plan de Gestion des Poissons Migrateurs
PGDCSL	Plagepomi Garonne Dordogne Charente Seudre et Leyre
CAPENA	Centre pour l'Aquaculture la Pêche et l'Environnement de Nouvelle-Aquitaine
MIGADO	Association Migrateurs GARonne DOrdogne Charente Seudre
UICN	Union International pour la Conservation de la Nature
CoGePoMi	Comité de Gestion des Poissons Migrateurs
ALF	Alose feinte <i>Alosa fallax</i>
ALA	Grande Alose <i>Alosa alosa</i>
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
PLS	Partial Linear Square
PLSR	Partial Linear Square Regression
VIF	Variable Importance of Projection
AIC	Akaike Information Criterion
AICc	Akaike corrected Information Criterion
RMSEP	Root Mean Square Errors of Predictions
LOOCV	Leave-One-Out Cross Validation
IC	Intervalle de Confiance
RFID	Radio Frequency IDentification

Tables de figures et tableaux

- Figure 1.** Phénotype de la grande alose et de l'alose feinte.
- Figure 2.** Cycle de vie classique du genre *Alosa*.
- Figure 3.** Localisation de la zone d'étude sur le littoral Atlantique.
- Figure 4.** Localisation des frayères recensées et suivies sur la zone d'étude.
- Figure 5.** Dispositif d'enregistrement utilisé pour le suivi de la reproduction de l'alose.
- Figure 6.** Matrice de corrélation de Spearman entre les variables environnementales.
- Figure 7.** Nombre de bulls prédatés et non prédatés entendu au cours des 26 nuits échantillonnées à Taillebourg en relation avec la température de l'eau à Taillebourg et le débit moyen à Saint-Savinien.
- Figure 8.** Nombre cumulé de bulls entendu sur la frayère de Taillebourg par quart d'heure échantillonné.
- Figure 9.** Graphique de sélection du modèle PLSR optimal évaluant le nombre de composantes à retenir par rapport à l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP).
- Figure 10.** Nombre cumulé de bulls entendu sur les quarts d'heure dépouillés et prédit sur les quarts d'heure manquants pour la frayère de Taillebourg en 2023.
- Figure 11.** Cartographie 2023 de l'activité de reproduction des frayères du bassin de la Charente.
- Figure 12.** Estimation du nombre de géniteurs d'aloses feintes calculé par année depuis 2014
- Tableau 1.** Importance des variables prédictives (VIP) dans la projection du nombre de bulls du modèle PLSR à 5 composantes.
- Tableau 2.** Résultats du test jack montrant les coefficients de régression du modèle à 5 composantes.
- Tableau 3.** Coefficient multiplicateur et IC_{95} calculés à partir du nombre total cumulé de bulls entendu pendant les quarts d'heure dépouillés et prédit pour les quarts d'heure non dépouillés.
- Tableau 4.** Nombre total de bulls estimé à Taillebourg pour la saison 2023.

Contexte juridique et scientifique

Suite à la sécheresse historique de 1976, les conseils généraux des départements de la Charente, de la Charente-Maritime, des Deux-Sèvres et de la Vienne se regroupent et créent en 1977 l'Institution du fleuve Charente. La structure est reconnue Établissement Public Territorial de Bassin (EPTB) en 2007 et devient l'EPTB Charente. Sa mission est de proposer, à l'échelle du bassin de la Charente, une gestion de l'eau cohérente pour assurer la prévention des inondations, l'amélioration du régime hydraulique en période de crue ou d'étiage, le maintien ou la reconquête de la qualité des eaux et des milieux aquatiques ainsi que la valorisation touristique du fleuve et de ses affluents. L'objectif est de favoriser la concertation entre les collectivités territoriales compétentes pour une harmonisation et une coordination des actions dans la gestion des eaux superficielles du bassin hydrographique.

Conduit par une forte volonté locale, l'EPTB Charente décide en 2009 de s'associer au Centre pour l'Aquaculture, la Pêche et l'Environnement de Nouvelle-Aquitaine (CAPENA, anciennement Centre Régional d'Expérimentation et d'Application Aquacole) et l'Association Migrateurs Garonne Dordogne Charente Seudre (MIGADO, anciennement Groupement des fédérations de pêche du Poitou-Charentes) pour former une cellule d'animation Migrateurs Charente Seudre (CMCS) qui agit communément autour d'un programme unique pour la sauvegarde et la restauration des populations de poissons migrateurs. Fondé sur la concertation des acteurs locaux, régionaux, techniques et financiers, le programme d'actions pluriannuel piloté par la CMCS est aussi, et surtout, institué dans le respect des évolutions réglementaires françaises et européennes qui intègrent une dimension piscicole dans leurs finalités. La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) et le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin (SDAGE) fixent notamment les objectifs stratégiques à atteindre en termes de qualité des eaux et de continuité écologique. Ces documents d'orientation sont déclinés à l'échelle des différents bassins versants français et sont mis en cohérence avec les enjeux migrateurs par l'intermédiaire d'un Plan de Gestion Poissons Migrateurs (PlaGePoMi) pour constituer une base de travail à l'établissement des classements réglementaires de la loi sur l'eau et des milieux aquatiques (Article L.214-17) notamment. Les PlaGePoMi fixent pour 6 ans les mesures utiles à la reproduction, au développement, à la conservation et à la circulation des espèces, les plans de soutien d'effectif ainsi que les conditions d'exercice de la pêche dans leurs bassins respectifs.

L'EPTB Charente, par la biais de la CMCS, doit aujourd'hui répondre au PlaGePoMi Garonne, Dordogne, Charente, Seudre et Leyre 2022-2027 (PGDCSL, 2022-2027) qui estime nécessaire que tous les moyens soient mis en œuvre pour améliorer les connaissances relatives aux

poissons migrateurs des bassins Charente et Seudre. Ce plan intègre la réalisation d'une étude visant, pour chaque espèce amphihaline présente, à déterminer les limites de migration, à cartographier les sites existants et potentiels de reproduction, à évaluer les stocks de migrateurs mais également à caractériser les menaces environnementales. Cela s'applique à l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*), la lamproie marine (*Petromyzon marinus*), la lamproie fluviatile (*Lampetra fluviatilis*), le saumon atlantique (*Salmo salar*) ainsi que la grande alose (*Alosa alosa*) et l'alose feinte (*Alosa fallax*). Considérées comme en déclin, ces deux dernières espèces sont particulièrement présentes sur la Charente et font l'objet d'un suivi annuel réalisé par la CMCS depuis 2009.

Mes missions au sein de l'EPTB et de la CMCS étaient multiples. Principalement, mon but a été d'assurer le suivi de la grande alose et de l'alose feinte pour l'année 2023. À partir d'un protocole conçu et validé pour le bassin versant de la Charente, j'ai dû caractériser qualitativement et quantitativement l'état global de la reproduction des aloses. Mes tâches se sont rapportées à la réalisation, la programmation et au suivi du déroulement des opérations, ainsi qu'à la saisie, la synthèse et l'analyse statistique des résultats obtenus en 2023. En parallèle, j'ai participé à l'identification du front de migration 2023 des aloses, aux projets d'optimisation du suivi et aux autres actions de la CMCS qui visent à progresser sur les connaissances des deux aloses (dévalaison, aire de répartition, ...) et les pressions qu'elles subissent. J'ai également eu la chance d'initier la réflexion sur la présence des corbicules et leur impact sur le milieu dont la Charente. Grâce à ce travail, il devrait être possible de constituer un nouvel indicateur annuel de l'état des populations d'alose en 2023 pour répondre au cadre de gestion défini par le PlaGePoMi.

Sommaire

INTRODUCTION	1
MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	4
1. Modèle biologique.....	4
1.1. Généralités	4
1.2. Morphologie et régime alimentaire	5
1.3. Cycle biologique	6
2. Zone d'étude.....	7
2.1. Le bassin versant de la Charente	7
2.2. Le fleuve Charente	8
2.3. Les frayères suivies.....	8
3. Méthodes de suivis	9
3.1. Suivi quantitatif de la reproduction des aloses feintes.....	9
3.2. Suivi qualitatif de la reproduction des aloses feintes et grandes aloses.....	11
3.3. Suivi du front de migration des grandes aloses.....	11
4. Acquisition des variables abiotiques	11
5. Analyse des données	12
5.1. Traitement des données manquantes.....	12
5.2. Estimation du nombre de géniteurs d'aloise feinte	14
RÉSULTATS.....	15
1. Suivi quantitatif	15
1.1. Résultats bruts.....	15
1.2. Résultats manquants	17
1.3. Estimation du nombre de géniteurs	20
2. Suivi qualitatif.....	20
3. Suivi du front de migration.....	21
DISCUSSION.....	21
1. Une reproduction modulée par des conditions environnementales particulières.....	21
2. Des pressions qui évoluent	24
3. Estimation du nombre de géniteur : un indicateur utile mais sensible	25
BIBLIOGRAPHIE	27

ANNEXES	34
RÉSUMÉ / ABSTRACT	37

Introduction

La migration se produit chez tous les grands taxons animaux et résulte de la séparation géographique, saisonnière et ontogénétique des habitats optimaux pour l'alimentation et la reproduction (Northcote, 1984). Cependant, les schémas spatiaux, les comportements migratoires et les avantages associés varient énormément selon les espèces, les individus et le milieu (*Alerstam et al.*, 2003 ; Dingle & Drake, 2007). Les poissons migrateurs anadromes sont connus pour effectuer leur croissance en eau salée et leur reproduction en eau douce grâce à la migration des adultes vers les rivières continentales (McDowall, 1989). Ensemble, ces deux traits fondamentaux d'histoire de vie constituaient initialement un avantage évolutif qui renforçait la résilience et assurait la persistance des individus (Figge, 2004). La stratégie dynamique de l'anadromie permet la colonisation de nouveaux habitats et le maintien d'une diversité génétique reconnue pour atténuer l'effet des variations spatiales et temporelles de la qualité des habitats (Keefer et Caudill, 2014). Dans un tel environnement hétérogène, la sélection naturelle conduit à une adaptation locale capable de limiter les effets négatifs de la migration et d'améliorer la condition physique (Hendry *et al.* 2004). La capacité des poissons potamotoques (*i.e anadromes*) à se déplacer entre habitats leur garantit un recrutement réussi en zone d'alevinage et un développement privilégié en zone marine très productive. Au sein de ce système migratoire, les avantages moyens en termes de fitness, par le biais d'une croissance ou d'une survie accrue, l'emportent sur les coûts du mouvement. Malgré tout, l'achèvement d'un cycle de vie si complexe est menacé par l'accumulation de pressions migratoires et les effets croissants des influences anthropiques sur les systèmes environnementaux (Waldman *et al.*, 2016). Le changement entre eaux douces et salées induit une pression osmotique et les trajets migratoires, une dépense importante d'énergie (Zydwski & Wilkie, 2012). Devenus vulnérables, les poissons sont aussi plus sensibles à la prédation et aux risques de maladies (Baudoin *et al.*, 2014 ; Guillerault *et al.*, 2015). Ces dernières décennies, il a été constaté que les populations de poissons migrateurs ont subi un déclin dramatique en raison de la surpêche marine et continentale, de la dégradation et de la fragmentation de l'habitat, ainsi que de la pollution de l'eau (Linburg et Waldman, 2009 ; Masters *et al.*, 2006). De nombreuses études ajoutent les effets du changement climatique aux menaces qui affectent significativement les poissons migrateurs (Costa-Dias *et al.*, 2009 ; Drouineau *et al.*, 2018b ; Jatteau *et al.*, 2017 ; Lassalle *et al.*, 2008) avec parfois une avancée du départ en migration (Legrand, 2021). Pour la plupart des populations anadromes, la série de facteurs de stress ont simplifié leur cycle de vie, de sorte qu'un très petit nombre d'entre elles présente plusieurs cycles (Turner et Limburg, 2012). Limburg et Waldman (2009) ont ainsi établi que les indices d'abondance ont chuté de plus de 90 % pour 24 des 35 populations d'espèces anadromes étudiées dans le Nord de l'Europe. La disparition progressive de cette communauté piscicole tend à remettre en cause le lien écologique

majeur qu'il existe entre les réseaux terrestres, marins et d'eau douce, notamment par le rôle primordial de transfert de matière et d'énergie qu'elle joue entre les trois écosystèmes (Moore *et al.*, 2004 ; Petticrew *et al.*, 2011). L'émission de gamètes et la décomposition des cadavres, qui suit la mort des individus, fournissent des nutriments et créent une ressource alimentaire essentielle pour les vertébrés (Cederholm *et al.*, 1999) et invertébrés (Winder *et al.*, 2005). Sous l'action des inondations et du déplacement par les consommateurs, l'impact écologique sur la dynamique des réseaux alimentaires et le recyclage des nutriments s'étend vers les écosystèmes terrestres voisins (Gende *et al.*, 2002 ; Samways *et al.*, 2018). Du fait de cette place importante dans les écosystèmes, des milieux variés qu'ils fréquentent et de leur sensibilité aux modifications de l'environnement, les poissons anadromes se sont naturellement imposés comme d'excellents indicateurs de la qualité des fleuves et des estuaires. Ce sont aujourd'hui des espèces à enjeux qui occupent une place importante dans les politiques de gestion des eaux continentales mondiales (Germaine & Barraud, 2013 ; Thomas & Germaine, 2018).

La grande alose [*Alosa alosa* (Linnaeus, 1758)] et l'alose feinte [*Alosa fallax* (Lacépède, 1803)] sont deux espèces de migrateurs anadromes du genre *Alosa* qui coexistent naturellement dans les habitats côtiers Atlantique-Est et méditerranéen français. L'alose feinte et la grande alose sont toutes deux inscrites dans l'annexe III de la convention de Berne (Baglinière *et al.*, 2003) et de Barcelone ainsi que dans les annexes II et V de la directive « Faune-Flore-Habitat » de la communauté européenne (CEE, 1992). Aussi, bien qu'elles soient classées dans la catégorie « préoccupation mineure » de la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (IUNC, 2008), les deux espèces sont respectivement considérées comme « en danger critique d'extinction » et « quasiment menacé » par le comité français de l'IUCN en 2019 (IUCN Comité français, MNHN, SFI & AFB, 2019). Leurs populations ont grandement diminué depuis plusieurs années (Limburg et Waldman, 2009) et a conduit à la réduction importante de leurs aires de répartition en France et en Europe (Sabatié, 1993 ; Baglinière, 2000 ; Taverny *et al.*, 2000). Bien que le déclin des aloses soit généralisé sur le territoire français, il existe toutefois des contrastes selon les rivières, les bassins versants et les territoires (Legrand *et al.*, 2020 ; Merg *et al.*, 2020). Sur le territoire français, les recherches sur sa biologie et son état de conservation se sont principalement concentrées sur les populations des grands systèmes fluviaux côtiers, tels que la Loire (Mennesson-Boisneau et Boisneau, 1990), la Garonne (Cassou-Leins et Cassou-Lein, 1981), la Gironde (Taverny *et al.*, 2000), l'Adour (Prouzet *et al.*, 1994) et le Rhône (Le Corre, 1999). D'autres peuplements sont retrouvés sur des fleuves plus petits à l'image de la Charente (Véron *et al.*, 2001) qui, malgré sa taille réduite, caractérise un espace à enjeux patrimoniaux faisant l'objet d'une attention particulière très récente.

Entre la Gironde et la Loire, le bassin de la Charente occupe une position privilégiée sur la façade atlantique et représente un territoire d'importance pour la reproduction, la croissance et le développement des poissons migrateurs. Il héberge une population historique d'alse feinte et grande alse qui réalise un homing natal au sein du fleuve Charente et de ses affluents. Cependant, le fleuve subit des altérations physiques du milieu qui modifient ses caractéristiques naturelles. La multiplication des grands ouvrages hydrauliques sur le fleuve Charente constituent des obstacles successifs à l'ensemble des migrateurs qui se trouvent freinés voire totalement stoppés (Assis, 1990). C'est d'autant plus vrai pour le genre *Alosa* qui n'expriment pas de comportement de saut et dont la capacité de nage est reconnue pour être plus faible que celle des Salmonidés (Whitehead, 1985). Des mortalités par épuisement, un stress et des blessures suite à des tentatives de franchissement répétées sont souvent observés (Larinier *et al.*, 1994 ; Baudoin *et al.*, 2014). Ainsi, l'exigence des aloses vis-à-vis des conditions de franchissement fait que leur présence sur l'ensemble du bassin fluvial est un indice de la continuité écologique qui garantit une libre circulation des êtres vivants. La plupart du temps, la présence d'ouvrage oblige aussi les géniteurs d'aloses à choisir leur site de fraie par défaut puisqu'ils colonisent seulement ceux auxquels ils ont accès. Ces frayères forcées contraignent les aloses à partager leur site de reproduction, augmentant le risque de pollution génétique par un phénomène d'hybridation (Alexandrino *et al.*, 2006). Outre les risques d'hybridation, le regroupement pour la reproduction rend les individus particulièrement vulnérables à la prédation par les espèces allochtones de grande taille comme le silure glane (*Silurus glanis*). Une étude a même montré que les espèces migratrices anadromes représentaient en moyenne 50% de la consommation des silures (Syväranta *et al.*, 2010). Sur la Charente, cette espèce invasive se développe intensément et participe au déclin des populations (CMCS, 2022). La qualité de l'eau est aussi identifiée comme un paramètre prépondérant dans la survie des aloses. Au sein des départements de la Charente et la Charente-Maritime, elle est très souvent dégradée par la consommation excessive de produits phytosanitaires (EPTB, 2016).

La volonté croissante de comprendre les interactions entre la biodiversité et les changements environnementaux pour la conservation des espèces animales et végétales a conduit à l'élaboration et à la mise en œuvre de nombreux programmes de surveillance écologique dans le monde entier (Nichols & Williams, 2006). La sauvegarde et la protection des espèces patrimoniales passent par une connaissance précise des populations et une identification de leurs spécificités biologiques et écologiques. Pour les poissons migrateurs, il s'agit de comprendre la structure des peuplements encore en place et leur dynamique dans le temps et l'espace. Afin de les évaluer, plusieurs outils sont préconisés et permettent de disposer d'indicateurs capables de refléter avec fiabilité l'état et l'évolution du niveau d'abondance des espèces. Les suivis biologiques interannuels sont une méthode souvent adoptée par les plans de gestion des poissons migrateurs des différents bassins versants

français. Beaucoup d'entre eux ont permis des avancées scientifiques importantes et fourni des informations cruciales pour la politique environnementale (Lovett *et al.*, 2007). Sur le bassin versant de la Charente, l'état des populations d'aloses est jugé grâce à un suivi quantitatif et qualitatif de la reproduction en zone de fraie ainsi que d'un suivi du front de migration. Les objectifs principaux de ce mémoire sont donc d'évaluer la dynamique des populations d'aloses en 2023 pour fournir au Comité de Gestion des Poissons Migrateurs (CoGePoMi) Garonne, Dordogne, Charente, Seudre et Leyre, les éléments lui permettant de mettre en place une gestion durable (PGDCSL, 2022-2027). Il s'agit en premier lieu de mesurer un indicateur des stocks d'aloses par l'estimation du nombre de géniteurs d'alse feinte d'une des plus grosses frayères du bassin versant de la Charente à partir d'une analyse sonore de l'activité de reproduction. Plus précisément, nous avons cherché à modéliser statistiquement ce nombre à partir de modélisations PLSR et polynomiales qui prennent en compte les facteurs environnementaux du milieu de fraie comme prédicteurs. Dans un second temps, un suivi sur l'ensemble du bassin versant de la Charente a eu lieu afin de caractériser la reproduction et la migration des aloses dans sa globalité. Du point de vue qualitatif et quantitatif et au regard des conditions environnementales, il est attendu que l'état des populations et des conditions de circulation de l'alse en 2023 soient meilleurs qu'en 2022.

Matériels et méthodes

1. Modèle biologique

1.1. Généralités

La grande alose et l'alse feinte sont des *Clupéiformes*, de la famille des *Clupéidés* et de la sous-famille des *Alosinés*. Elles font partie des 16 espèces appartenant au genre *Alosa*, groupe caractérisé par des particularités anatomiques communes, à savoir une échancrure médiane sur la mâchoire supérieure, 8 rayons des nageoires pelviennes et un recouvrement des branchiospines inférieures et supérieures entre elles dans l'axe médian de l'arc branchial (Whitehead, 1985).

Selon sa répartition géographique, le genre *Alosa* peut être divisé en trois sous-groupes : un groupe Atlantique Ouest, un groupe ponto-caspien et un groupe Atlantique-Est/Méditerranée dont la grande alose et l'alse feinte sont les uniques représentantes (Baglinière, 2000). Dans chaque cas, les aloses colonisent la plupart des habitats aquatiques disponibles, des zones littorales et pélagiques marines jusqu'aux axes fluviaux côtiers accessibles sur le plateau continental.

La grande alose occupait auparavant la Méditerranée occidentale et le bassin Atlantique du Maroc à la Norvège (Blanc *et al.*, 1971 ; Lelek, 1980), alors qu'elle est aujourd'hui seulement recensée du

Portugal au Rhin où elle a bénéficié d'un vaste plan européen de réintroduction de juvéniles (Jatteau *et al.*, 2008). Dans l'attente de la viabilité de ces populations, la limite septentrionale de répartition de la grande alose semble se situer actuellement au niveau de petits fleuves normands et bretons. L'aloise feinte, qui possède une plasticité écologique supérieure à la grande alose, a subi une réduction moins importante de son aire de répartition au cours du temps. Autrefois retrouvée de la Scandinavie jusqu'au sud du Maroc (McDowald, 1989), elle ne s'étend plus que des îles britanniques au Maroc. En France, cette alose colonise résiduellement la Seine mais reste abondante dans tous les grands fleuves français atlantiques fréquentés par la grande alose (Keith *et al.*, 2020).

1.2. Morphologie et régime alimentaire

Morphologiquement, la grande alose et l'aloise feinte se caractérisent par un corps harengoïde fusiforme légèrement comprimé latéralement et pourvu d'une carène ventrale formée d'écaillés particulières dirigées vers l'arrière, les scutelles. Les deux espèces sont généralement distinguées par trois caractères : le nombre de branchiospines, la taille et l'écaillure (Fig. 1).

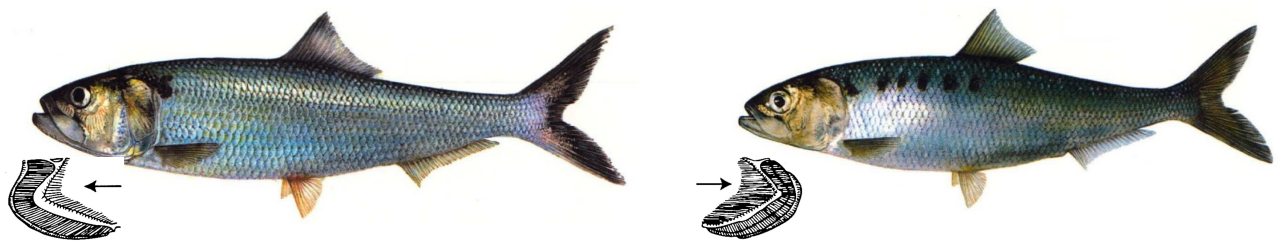


Figure 1. Phénotype de la grande alose (gauche) et de l'aloise feinte (droite) (adapté de Louisy & Robin, 2013)

La grande alose possède un corps fort avec un profil dorsal très incurvé et une bouche large dirigée vers le haut. On distingue aussi une large tâche noire en arrière de l'opercule, parfois suivie d'une ou plusieurs petites tâches. Respectivement, la taille et le poids de la grande alose adulte peuvent varier de 30 à 70 cm et 1 à 3,5 kg. (Rochard et Woillez, 2003).

L'aloise feinte propose un corps plus allongé et une forme plus cylindrique moins incurvée dorsalement. Sa tête affiche en arrière de l'opercule une rangée de 4 à 8 tâches noires marquées. L'aloise feinte est aussi plus petite et plus légère avec une taille moyenne de 42 cm et un poids moyen d'environ 0,66 kg (Bensettiti & Gaudillat, 2004).

Même si, à maturité sexuelle, une observation directe permet de différencier les deux espèces, le critère majeur de distinction est le nombre de branchiospines sur le premier arc branchial. Au stade adulte et à taille égale, le nombre de branchiospines des grandes aloses est supérieur à celui des aloses feintes (Taverny, 1991). Ce nombre est supérieur à 90 pour la grande alose et inférieur à 60 pour l'aloise feinte (Quignard & Douchement, 1991).

L'aloise feinte et la grande aloise ne partagent pas le même régime alimentaire. La grande aloise est principalement planctophage, se nourrissant d'euphausiacés et de copépodes pélagiques, alors que l'aloise feinte complète son régime par une alimentation piscivore. En eau douce, l'alimentation des adultes est moins intense voire stoppée pour la grande aloise qui respecte une période de jeûne. Concernant les juvéniles, ils se nourrissent de larves d'insectes aquatiques.

1.3. Cycle biologique

1.3.1. Particularités

L'aloise feinte et la grande aloise sont des poissons migrateurs amphihalins anadromes. Elles suivent un cycle de vie complexe (Fig. 2) au cours duquel les adultes se rassemblent dans les estuaires pour migrer vers les eaux douces des rivières où ils vont se reproduire et pondre au niveau des sites de fraie. Une fois éclos, les juvéniles redescendent vers le milieu marin par les estuaires pour effectuer la majorité de leur croissance (Arahamian & Aprahamian, 2001).

1.3.2. Migration

Généralement, la période de migration en eau douce des aloses se situe en fin d'hiver et durant le printemps. La dynamique migratoire est cependant structurée par un grand nombre de facteurs externes.

Une remontée plus précoce (1 mois) et plus longue (4 à 4,5 mois contre 3 à 3,5 mois) est observée pour la grande aloise que pour l'aloise feinte. Celle de la grande aloise présente aussi une plus forte variabilité interannuelle des dates de début et de fin. D'ailleurs, l'âge à la remontée des géniteurs s'étale de 3 à 8 ans pour la grande aloise et de 2 à 9 ans pour l'aloise feinte. Pour chaque espèce, les mâles migrent plus tôt que les femelles car ils atteignent la maturité sexuelle un an plus tôt.

La migration est aussi très dépendante de la marée, du débit (Douchement, 1981 ; Gallois, 1946) et de la température de l'eau (Schlosser & Angermeier, 1990 ; Acolas *et al.*, 2006). Elle ne peut d'ailleurs s'initier que pour une température supérieure à 11,0°C. Cependant la houle, la turbidité, la salinité, le vent, la latitude et la configuration de l'estuaire jouent également un rôle.

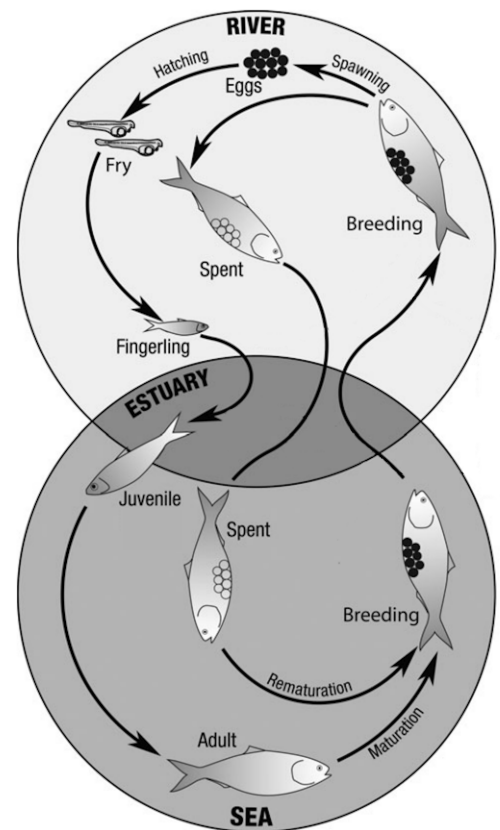


Figure 2. Cycle de vie classique du genre *Alosa* (adapté de Hossain *et al.*, 2016)

1.3.3. Reproduction

Les aloses débutent leur période de reproduction au mois d'avril pour finir courant du mois de juillet avec un pic d'activité en mai (Boisneau *et al.*, 1990). La fin de la période de reproduction conduit souvent à la mort des géniteurs par une extrême misère physiologique, notamment des grandes aloses (Cassou-Leins, 1981).

Pendant la journée, les géniteurs restent le plus souvent au repos derrière des blocs, puis leur activité augmente au crépuscule en se rassemblant sur les frayères pour y constituer des couples. La reproduction des aloses s'effectue en pleine eau, exclusivement de nuit entre 23h00 et 5h00 avec un pic souvent situé entre 1h00 et 3h00 du matin. Les couples formés entament alors un rituel comportemental spécifique appelé « bull ». Le mâle et la femelle montent à la surface pour venir frapper violemment la surface de l'eau à l'aide de leur nageoire caudale en exécutant un déplacement circulaire. C'est au cours d'un bull que les gamètes sont expulsés et que se produit la fécondation. Les mouvements d'eau créés lors d'un bull rendent l'acte de reproduction particulièrement repérable par l'oreille humaine. Son intensité sonore peut atteindre 35 à 50 dB pendant une durée de 3 à 5 secondes pour la grande alose contre 1 à 4 secondes pour l'alse feinte.

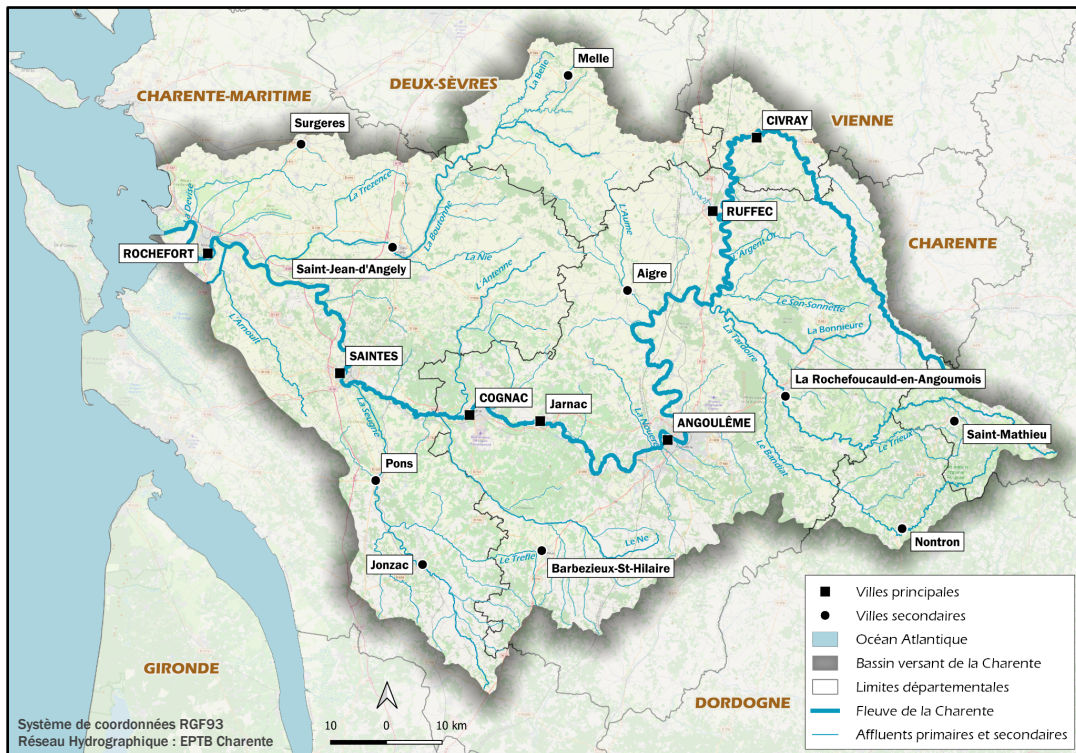
Le choix des zones de fraie par les aloses répond à des facteurs spécifiques, hydrauliques, bathymétriques et granulométriques. Une frayère est souvent caractérisée par une plage de substrat grossier délimitée par un profond à l'amont et une zone de radier ou à haut fond à l'aval. La localisation des frayères fait aussi appel à des prérequis biologiques qui créent une ségrégation spatiale des zones de reproduction entre les deux espèces d'ales atlantiques : la grande alose se reproduit plutôt dans les parties amont des bassins et l'alse feinte plutôt en aval.

2. Zone d'étude

2.1. Le bassin versant de la Charente

Le suivi a été conduit sur le bassin versant de la Charente, situé entre les estuaires de la Loire et de la Gironde (Fig. 3). Il forme une zone littorale d'environ 10 549 km² répartis sur 6 départements au sein de la région Nouvelle-Aquitaine dont la Charente, la Charente-Maritime, les Deux-Sèvres, la Vienne, la Haute-Vienne et la Dordogne. C'est un bassin sédimentaire à dominante rurale présentant une topographie très peu heurtée, exposé à un climat océanique et d'une altitude faible (100 à 200 m, en moyenne). Les précipitations annuelles varient entre 600 et 900 mm, avec une moyenne de 800 mm (Bry & Hoflack, 2004). Les activités agricoles couvrent environ 60% de cette zone et environ 11 % de la surface cultivée est irriguée. Cependant, 52% des masses d'eau de ce système fluvial risquent

de ne pas atteindre les objectifs de la DCE, en raison d'une pollution diffuse (nitrates et pesticides), attribuée aux activités et pratiques agricoles (Vernier *et al.*, 2010).



2.2. Le fleuve Charente

Le bassin versant de la Charente est drainé par le fleuve Charente, d'une longueur de 365 km et structuré par un total de 2 514 ouvrages recensés en 2021. Il prend sa source aux bordures du Massif central à Chéronnac (295 mètres d'altitude) en Haute-Vienne, et se jette dans l'Océan Atlantique au niveau de Port-des-Barques en Charente-Maritime. La Charente est soutenue par les apports de 22 affluents pour former un réseau hydrographique comportant 5 650 km de cours d'eau. À Saintes, son débit moyen annuel est de $140 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ avec une variation des débits mensuels moyens entre $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$ en basses eaux et $210 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$ en hautes eaux (Duquesne *et al.*, 2020), ce qui en fait un fleuve au régime relativement calme. Ce faible débit spécifique s'explique d'une part par l'apport faible de ses principaux affluents (la Tardoire et le Bandiat) et, d'autre part, en raison d'une pente moyenne très faible de l'ordre de 0,86‰ associé à un style fluvial très anastomosé qui donne au fleuve une spécificité paysagère remarquable.

2.3. Les frayères suivies

Un total de 46 frayères à aloses sont recensées sur la bassin versant dont 41 sur l'axe Charente et 4 sur la Seudre (Fig. 4). Leur activité est suivie annuellement depuis 2010. Dans cette étude, les sites à l'amont de Crouin sont considérés comme étant principalement des frayères à grandes aloses

alors que ceux à l'aval sont des frayères à aloses feintes. Il est cependant possible d'observer des actes de reproduction interspécifiques lorsque la continuité écologique est rompue.

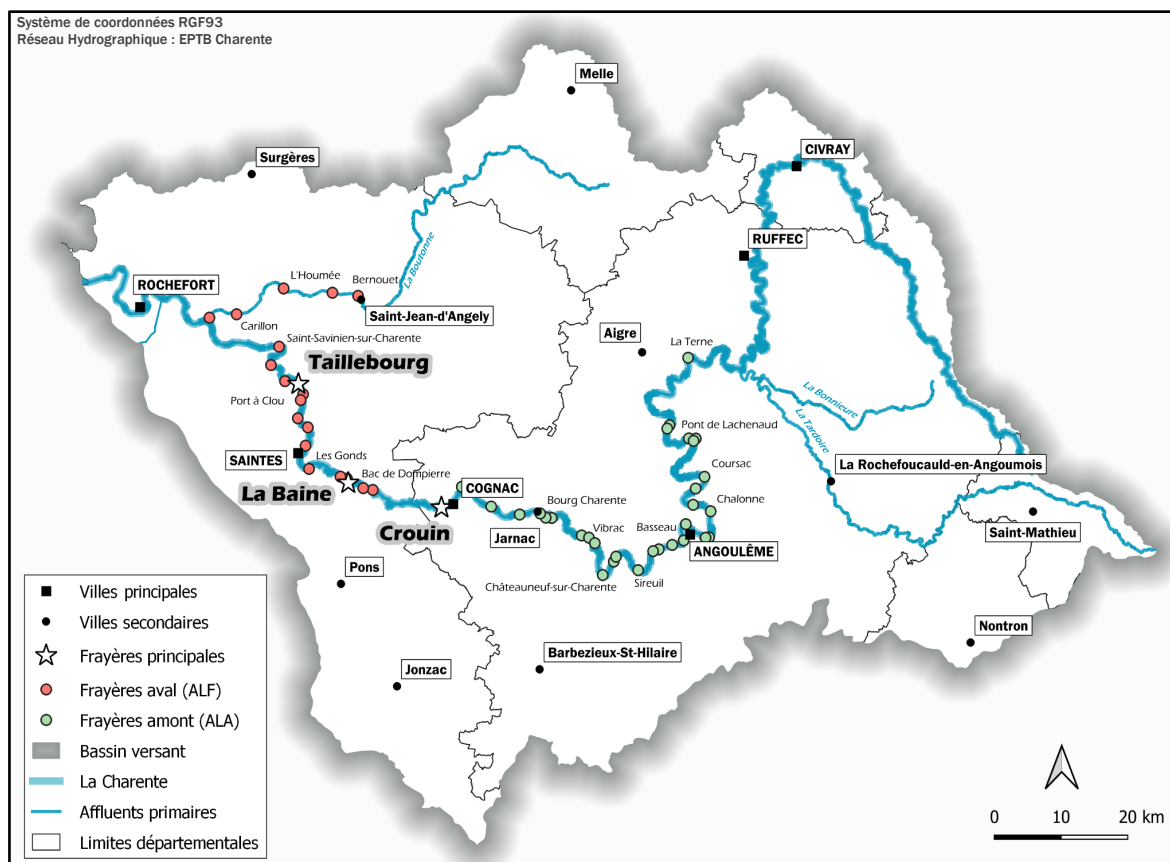


Figure 4. Localisation des frayères recensées et suivies sur la zone d'étude

Les frayères de Taillebourg, de Crouin et de La Baine sont considérées comme les plus gros sites de fraie du bassin, représentant à elles seules environ 50% de l'activité totale de reproduction pour les deux espèces d'aloses. Elles sont ainsi suivies de manière plus régulière et font l'objet de l'estimation du nombre de géniteurs. Cependant, les sites de Crouin et de La Baine ont été exclus de ce suivi particulier notamment en raison des risques d'hybridation constatés en pied de barrage à Crouin et des caractéristiques peu naturelles de fraie proposées à La Baine. Ainsi, depuis 2021, seule la frayère de Taillebourg est conservée pour l'estimation des géniteurs et devient l'indicateur de l'activité de reproduction pour les aloses feintes sur le bassin.

3. Méthodes de suivis

3.1. Suivi quantitatif de la reproduction des aloses feintes

Le suivi annuel de la reproduction des aloses feintes a été réalisé en quantifiant l'activité de fraie sur le site de Taillebourg pour en estimer le nombre de géniteurs. La période de suivi est définie comme la période allant de la première nuit à la dernière nuit de surveillance et inclut les nuits sans reproduction. Pour l'année 2023, elle s'étend du 6 avril au 6 juillet.

3.1.1. *Surveillance acoustique*

L'activité de reproduction a été estimée par surveillance acoustique passive en comptabilisant le nombre de bulls enregistré quotidiennement au cours de la période de fraie. Les bulls étant des évènements sonores, leur comptage est fait indirectement en utilisant un dispositif d'enregistrement sonore audionumérique composé d'un enregistreur Olympus WS-852 fermé hermétiquement et relié à un microphone mis en place sur une parabole fixée à un piquet en bois (Fig. 5). Le dispositif est posé en rive gauche et dirigé vers le centre de la frayère. Les enregistrements acoustiques sont effectués une fois par semaine en début et fin de saison de reproduction et 2 à 3 fois par semaine lors des pics d'activité. Les nuits incomplètes (enregistreur éteint ou vol) n'ont pas été prises en compte dans le suivi. Cette méthode d'échantillonnage est celle utilisée pour le suivi alose depuis 2014.



Figure 5. Dispositif d'enregistrement utilisé pour le suivi de la reproduction de l'alose

3.1.2. *Dépouillements audio*

L'ensemble des enregistrements est traité avec le logiciel Audacity© qui permet une écoute et une visualisation du spectre d'enregistrement. Une analyse auditive permet d'identifier les signaux acoustiques caractéristiques d'un bull (Annexe 2) et de les comptabiliser. On a ici estimé qu'uniquement les bulls d'une durée supérieure ou égale à deux secondes seraient considérés comme de vrais bulls. Les bulls prédatés par le silure émettent un bruit particulier qui permet leur identification et leur dénombrement. Les autres bulls sont considérés comme incomplets et exclus du comptage. Seules les bandes audio comprises entre 23h00 et 6h00 du matin ont été écoutées. Traditionnellement dans ce type d'étude, pour des raisons de qualité d'échantillonnage et de temps de dépouillement, le pas de temps de référence est le quart d'heure. Grâce aux conclusions d'une étude (Brias, 2014) menée sur l'ensemble du jeu de données issu du suivi interannuel, un scénario de réduction de l'effort de suivi a été mis en place et consiste à écouter un quart d'heure sur deux.

3.1.3. *Calibration*

A Taillebourg, le suivi est complété par une surveillance acoustique active. Elle consiste en un comptage direct des bulls par un binôme d'observateur équipé d'un compteur manuel et qui vient se placer au plus près de l'enregistreur afin de limiter le biais spatial. Ici aussi, les bulls d'une durée strictement inférieure à deux secondes ne sont pas pris en compte. L'objectif est de réaliser une calibration des enregistrements en comparant le nombre de bulls recueilli par l'appareil audio

numérique au nombre de bulls réellement entendus sur le terrain par l'oreille humaine. Certains bulls étant trop éloignés de la parabole ou certains bruits parasites apparaissant trop gênants, il est en effet possible de manquer certains bulls sur les enregistrements audio. Au total, quatre calibrations d'une heure ont eu lieu dans la saison à la même date que quatre enregistrements et sur une plage horaire correspondant au pic d'activité des aloses.

3.2. Suivi qualitatif de la reproduction des aloses feintes et grandes aloses

Des prospections nocturnes en coopération avec l'OFB sont faites en complément afin de caractériser l'état global de la reproduction des aloses feintes et grandes aloses sur l'ensemble des frayères du bassin versant. Cela permet de vérifier l'activité de migration et de reproduction mais aussi la fonctionnalité du milieu de fraie. Les prospections sont programmées en fonction du personnel disponible, des observations sur le site de suivi quantitatif, des observations sur le terrain par les techniciens et du retour des captures par les pêcheurs. Un binôme réalise un comptage de bulls à raison de 2*15 minutes par site pour 4 à 5 sites par nuit (Annexe 1). Le nombre de bulls observé ne peut pas être utilisé pour estimer les géniteurs comme sur le site de suivi quantitatif car l'effort de suivi n'est pas homogène sur l'ensemble de la saison. On parle ici d'un nombre brut, qui donne un indice qualitatif de l'intensité de reproduction et de la fréquentation des différents sites.

3.3. Suivi du front de migration des grandes aloses

Les informations de migration obtenues par le suivi de la reproduction sont complétées par la détermination du front de migration des grandes aloses qui donne un indice des conditions de circulation sur le bassin (continuité écologique). Il s'agit de localiser les limites amont de répartition des grandes aloses par la recherche, de l'aval vers l'amont, d'indice de présence lors d'observations visuelles d'individu en pied d'ouvrage, l'identification de zones de reproduction nouvelles et anciennes ou encore la présence de cadavres.

4. Acquisition des variables abiotiques

Pour rendre compte de la variation d'activité de reproduction des aloses feintes au cours de la saison, un certain nombre de variables abiotiques a été collecté. Il s'agit de facteurs hydrauliques et atmosphériques. Cela comprend la température de l'eau et de l'air, la pression atmosphérique, la pluviométrie, le débit, la marée et l'éclairage lunaire. Toutes ces données sont utilisées exclusivement pour le suivi quantitatif de la reproduction de l'aloise feinte et l'estimation du nombre de géniteurs. La sélection de ces facteurs se base sur leur capacité à influencer le nombre d'actes de reproduction par nuit et à caractériser au mieux le milieu de fraie. Cela inclut les variables reconnues par la bibliographie ainsi que celles identifiées par la CMCS au cours des 14 années de suivi.

Une sonde thermique de l'EPTB Charente installée à Taillebourg fournit des relevés horaires et journaliers de la température de l'eau. Les variations sur 24h, 48h et 72h ont été calculées.

Le débit est fourni par le département 17. Il correspond au débit journalier moyen de la Charente au barrage de Saint-Savinien, obtenu en sommant les valeurs de débit mesurées à la station de Beillant sur la Charente et à la Lijardière sur la Seugne. Les variations sur 24h, 48h et 72h ont été calculées.

Les coefficients de marée sont calculés par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) au port de l'île d'Aix. Ils donnent l'amplitude de la marée et vont de 20 à 120. Plus le coefficient est élevé, plus la mer est retirée en basse mer et plus elle est haute en pleine mer.

La visibilité nocturne est estimée par le pourcentage de luminosité lunaire indiqué dans le calendrier lunaire 2023. Cette variable prend en compte la nébulosité. Ainsi, dans des conditions de nébulosité à 50%, une pleine lune donnera 50% de visibilité contre 100% sans nébulosité.

L'ensemble des données météorologiques sont issues des observations météorologiques synoptiques historiques de France circulant sur le système mondial de télécommunication de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Les valeurs de nébulosité totale et de pression atmosphérique sont récupérées quotidiennement à horaire fixe (21h) pour la station de la Pointe de Chassiron (Île d'Oléron) tandis que la température moyenne de l'air et la pluviométrie proviennent de la station de Saintes et sont moyennées.

Une variable temporelle discrète (1 à 91) identifie les jours de la saison et permet de rendre compte des variations temporelles de l'activité de reproduction des aloses.

5. Analyse des données

Le protocole analytique a pour objectif de prédire les données manquantes (nombre de bulls) à l'échelle des nuits et des quarts d'heures. Il est mis en place de sorte d'obtenir les résultats les plus robustes possible. Le choix des méthodes statistiques fait suite à un ensemble de procédures de validation menées en amont et vérifiées chaque année. Il s'agit d'un protocole standardisé et utilisé par la CMCS. Des améliorations ont été apportées afin de simplifier les démarches et assurer une plus grande fiabilité. Le logiciel statistique R version 4.0.2 (R Core Team, 2019) a été utilisé pour effectuer toutes les analyses statistiques selon un niveau de significativité de 5%.

5.1. Traitement des données manquantes

5.1.1. Prédiction des nuits manquantes

L'objectif est d'évaluer l'activité de reproduction des aloses feintes lors des nuits non échantillonnées en prenant en compte la contribution relative des variables environnementales sur le nombre de bulls quotidien effectué. La prédiction des données est élaborée à partir d'un modèle de

régression linéaire par la méthode des moindres carrés partiels (PLSR). Cette méthode statistique est efficace pour les prédictions complexes en raison de sa capacité à analyser des jeux de données incomplets et contenant du bruit expérimental. Elle est aussi jugée utile pour traiter des variables explicatives nombreuses et fortement corrélées afin d'éviter le problème de surajustement potentiel qui se produit généralement avec les techniques de régressions multiples classiques (Carrascal *et al.*, 2009 ; Cushman *et al.*, 2008). La corrélation de l'ensemble des variables abiotiques a été vérifié en considérant un seuil de corrélation non paramétrique de Spearman de 0,7, après avoir constaté la non-normalité de plusieurs variables avec un test de Shapiro-Wilk. Au total, 10 variables ont montré une très forte corrélation avec au moins une autre variable (Fig. 6). Le recours à l'algorithme PLS permet de s'affranchir de ces difficultés sans supprimer de variables.

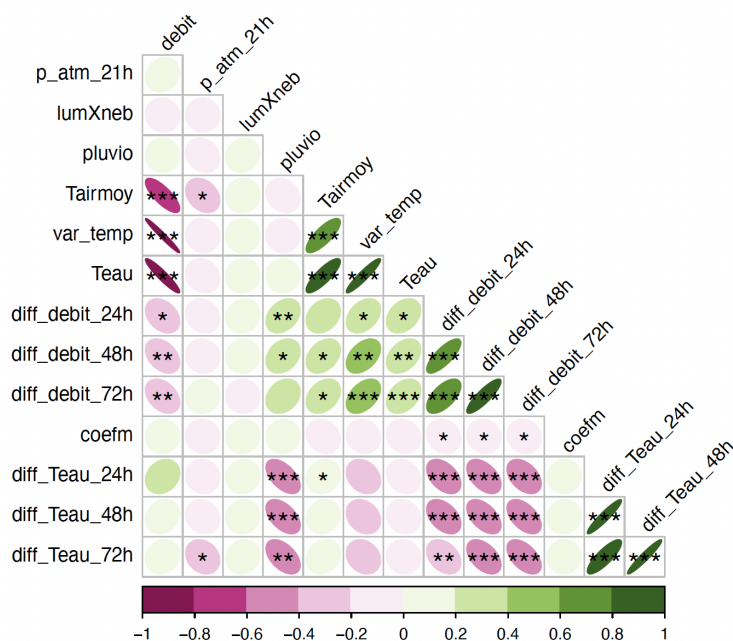


Figure 6. Matrice de corrélation de Spearman entre les variables environnementales ; les corrélations positives sont affichées en vert et les corrélations négatives en rose. L'intensité de la couleur, la taille du cercle et son orientation sont proportionnelles aux coefficients de corrélation. La significativité des corrélations est testée. Abréviations : *p_atm_21h* = pression atmosphérique ; *lumXneb* = luminosité lunaire ; *pluvio* = pluviométrie ; *Tairmoy* = température de l'air ; *Teau* = température de l'eau ; *diff_Teau* = variation de température en 24h, 48h et 72h ; *coefm* = marée ; *diff_debit* = différence de débit en 24h, 48h et 72h ; *var_temp* = variable temporelle

Ainsi, notre modèle PLSR repose sur la prise en compte de l'ensemble des variables et spécifie une relation linéaire entre les nombreuses variables prédictives et le nombre de bulls en comprimant les variables mesurées en quelques composantes principales non corrélées. Dans quelques cas, la modélisation d'une relation linéaire entre le nombre de bulls et la variable prédictive n'est pas appropriée. C'est le cas de la température de l'eau et de la variable temporelle qui semblent associés au nombre de bulls par une relation polynomiale et non linéaire. L'introduction de la non-linéarité dans l'approche PLS consiste à utiliser la méthode quadratique (Wold *et al.*, 1989) en insérant une relation polynomiale du second degré aux variables concernées. La sélection du modèle prédictif optimal répond à une validation croisée leave-one-out (LOO) (Wold, 1978) pour déterminer le nombre optimal de composantes qui minimise l'erreur moyenne quadratique de prédiction (RMSEP). L'importance de chaque variable prédictive dans le modèle a été évaluée par l'indice VIP et un test jack utilisant les estimations de variance du jackknife pour effectuer des tests t sur les coefficients de régression dans le but d'évaluer la signification statistique des prédicteurs.

5.1.2. Prédiction des quarts d'heure manquants

L'activité de reproduction entre 23h00 et 6h00 n'étant pas connue dans sa totalité, le nombre de bulls cumulé pour chaque quart d'heure non échantillonné est prédit à l'aide de modèles linéaires généralisés (GLM) de type poisson à différents degrés polynomiaux. L'indépendance des résidus ainsi que l'homoscédasticité des variances sont testés pour vérifier la validité de chaque modèle. Les performances de prédictions des GLM sont évaluées à l'aide du critère d'information d'Akaike (AIC), couramment utilisé pour examiner l'efficacité du modèle (Akaike, 1974). En raison de la petite taille de l'échantillon (14 quarts d'heure dépouillés), nous avons appliqué la version corrigée de l'AIC (AICc) comme critère de sélection du modèle. Le modèle avec le plus faible AICc est choisi.

5.1.3. Calibration des données

Une procédure de correction des résultats par régression linéaire est pratiquée en déterminant les coefficients de régression a et b de l'équation linéaire entre le nombre de bulls observé par les agents sur le terrain et celui entendu sur les enregistrements. Après vérification de la validité du modèle (résidus normaux et homoscédasticité des variances), l'équation obtenue est appliquée au nombre de bulls total compté pour les nuit suivies et interpolées.

5.2. Estimation du nombre de géniteurs d'alose feinte

La prédiction du nombre de bulls total sur la frayère de Taillebourg fournit une estimation du nombre de géniteurs d'alose de la frayère de Taillebourg. En raison du manque de connaissances sur le comportement reproducteur des aloses et notamment sur le fractionnement de la ponte en relation avec la maturation progressive des ovocytes dans le temps, l'estimation du nombre de géniteurs implique de considérer un certain nombre d'hypothèse à savoir que :

- Les géniteurs se reproduisent sur une seule frayère
- Un bull donne lieu à une ponte (une seule femelle est impliquée dans un bull)
- Le sexe ratio des aloses sur le site de fraie est de 1 : 1
- Une femelle pond en moyenne dix fois au cours d'une saison de reproduction
- Le nombre de géniteurs sur la zone de frayère est fixe. Il n'y a ni émigration ni immigration,

Ces critères sont choisis en accord avec les observations de Cassou-Leins (1985, 1986, 1988), les méthodes utilisées par la CMCS (Chanseau *et al.*, 2006) ainsi que dans le respect des indicateurs du PGDCSL. Leur prise en compte permet d'obtenir une formule algébrique de calcul suivante :

$$\text{Nombre de géniteur estimé} = \frac{\text{Nombre de bull total estimé}}{\text{Nombre de ponte}} \times 2$$

En dépit des biais qu'elle comporte, cette méthode d'estimation permet d'établir un indice d'abondance annuel de géniteur suffisant pour la gestion de la population d'alose feinte du bassin versant de la Charente (Cassou-Leins *et al.*, 2000).

Pour chaque étape de prédiction du nombre de bulls par nuit et quart d'heure ainsi que de standardisation des résultats par calibration, un intervalle de confiance IC₉₅ est calculé à partir des erreurs standards.

Résultats

1. Suivi quantitatif

1.1. Résultats bruts

La frayère de Taillebourg a été suivie pendant 26 nuits réparties entre le 6 avril 2023 et le 6 juillet 2023. Trois nuits n'ont pas été prises en compte car les enregistrements étaient incomplets. Pour chaque nuit, 14 quarts d'heure sur 28 sont dépouillés, ce qui correspond à un total de 350 quarts d'heure soit 87,5 heures d'enregistrement écoutées en 2023. Sur l'ensemble de la saison, 1 309 bulls ont été entendus dont 52 bulls prédatés. L'activité de fraie était assez irrégulière avec un minimum de 1 bull entendu en début et fin de suivi ainsi qu'un maximum de 221 bulls le 18 mai (Fig. 7), pour une moyenne de 10 bulls en avril et juin et 123 bulls en mai. Des baisses d'activités ont été constatées durant le pic d'activité cyclique, notamment le 22 mai où seulement 66 bulls ont été recensés.

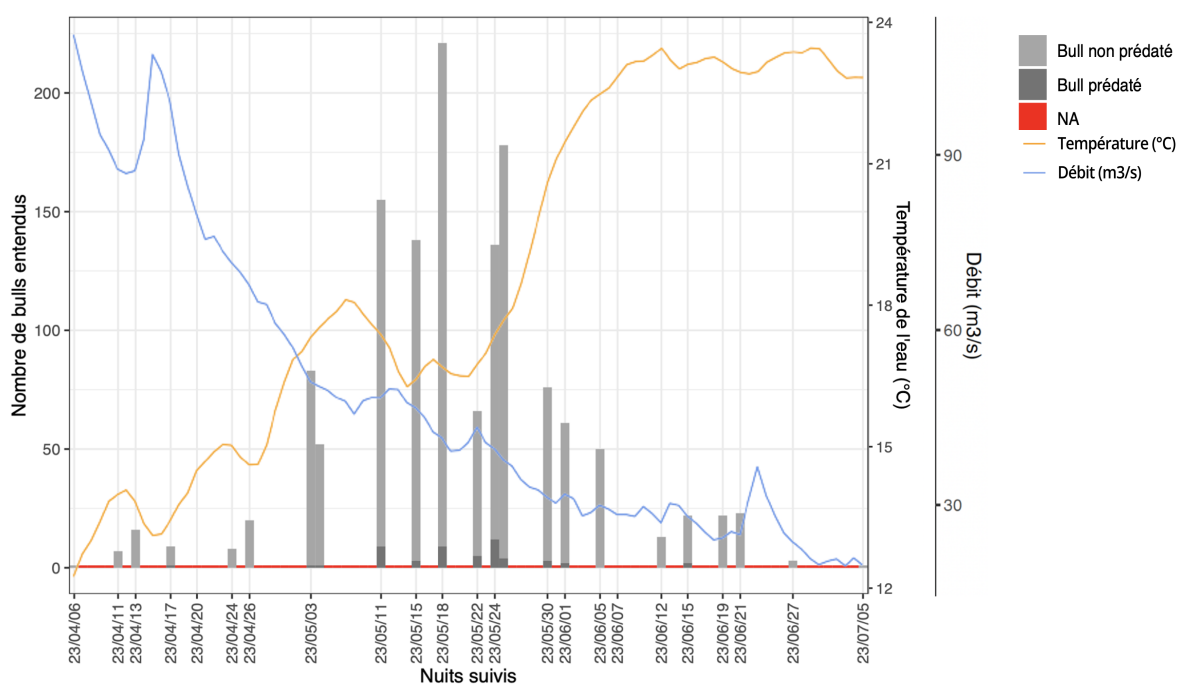


Figure 7. Nombre de bulls prédaté et non prédaté entendu au cours des 26 nuits échantillonnées à Taillebourg en relation avec la température de l'eau à Taillebourg et le débit moyen à Saint-Savinien. Le nombre de bulls lors des 65 autres nuits n'est pas connu.

Au cours des nuits échantillonnées, la reproduction augmente rapidement à partir de 23h00 pour atteindre un pic d'activité à 00h30 du matin où un total de 199 bulls a été entendus pour ce quart d'heure, de façon cumulé sur toutes les nuits (Fig. 8). Elle décroît ensuite rapidement jusqu'à 6h00. La distribution temporelle du nombre de bulls cumulé par quart d'heure au cours d'une nuit suit typiquement une distribution gaussienne centrée sur le quart d'heure 00h30/ 00h45 et s'étendant de 23h00 à 6 h00 du matin. Aussi, on estime à 3,9% le nombre de bulls prédaté par nuit en 2023, ce qui est supérieur aux taux de prédation de 2021 et 2020 qui s'élevaient à 2,9%.

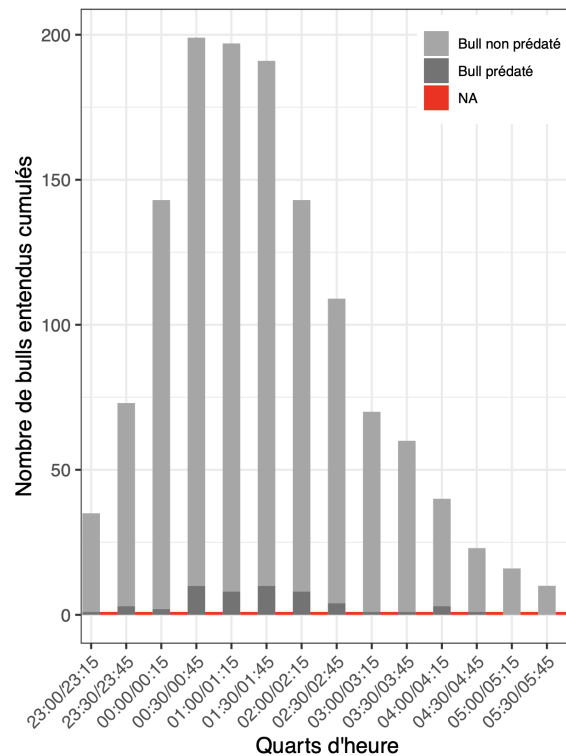


Figure 8. Nombre cumulé de bulls entendu sur la frayère de Taillebourg par quart d'heure échantillonné

En 2023, la saison de reproduction des aloses feintes à Taillebourg est caractérisée par une température de l'eau fluctuant en moyenne entre 12,4°C (début de reproduction) et 22,9 °C (fin de reproduction) et accompagnée de pic atteignant 23,5°C (Fig. 6). Nous pouvons aussi signaler une chute temporaire de température entre le 07/05/2023 et le 26/05/2023 qui semble coïncider avec la période du pic d'activité de reproduction. Le débit a varié entre 109,4 et 18,3 m³/sec en diminuant fortement puis progressivement dès le début du suivi (Fig. 7). Cette année, des hausses de débit ont été observées en réponse à des précipitations importantes qui ont atteint 15,2 mm et 20,4 mm le 21 mai et 21 juin. Des crues bisannuelles ont aussi été constatées sur la Charente aval en début de suivi à la suite de pluies consécutives importantes entre le 10 et 14 avril. En moyenne, les débits d'avril, mai et juin 2023 sont nettement supérieurs aux débits moyens observés sur la chronologie des données. La température de l'air a atteint un maximum de 33,6°C et un minimum de 3,5°C pour une moyenne saisonnière de 18,2°C.

1.2. Résultats manquants

1.2.1. Prédiction des nuits manquantes

L'effet des variables abiotiques sur la reproduction des aloses feintes à l'échelle de la saison est modélisé par une régression PLS à 16 composantes. La validation croisée LOO montre que le choix de 6 composantes donne l'erreur de prédiction RMSEP la plus faible (Fig. 9). Cependant, la variabilité expliquée par un modèle à 5 composantes est de 76.25 % contre seulement 77.09 % pour un modèle à 6 composantes. Le gain d'information de prédiction étant trop minime, il est préférable de conserver un modèle PLSR à 5 composantes.

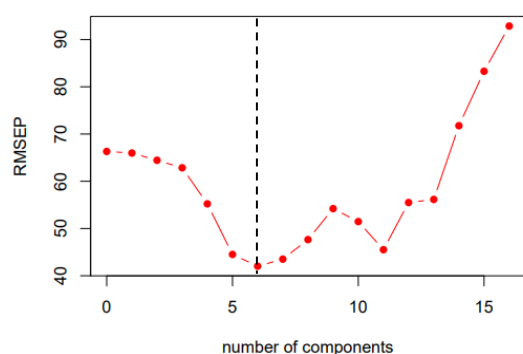


Figure 9. Graphique de sélection du modèle PLSR optimal évaluant le nombre de composantes à retenir par rapport à l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP). Le modèle optimal se base sur 6 composantes.

Les valeurs VIP du modèle (Tab. 1) indiquent que la pression atmosphérique était le facteur le plus important, suivi par les variables polynomiales de temps et température, le débit et la luminosité.

Composante	1	2	3	4	5
Température de l'eau (°C)	0.003	0.005	0.070	0.059	0.059
Température de l'eau (degré II)	0.203	0.115	1.607	2.227	2.037
Δ24h température de l'eau	0.0001	0.0004	0.001	0.002	0.005
Δ48h température de l'eau	0.003	0.0009	0.009	0.008	0.018
Δ72h température de l'eau	0.0007	0.002	0.023	0.027	0.041
Température de l'air (°C)	0.003	0.006	0.097	0.083	0.079
Débit (m³/s)	0.04	0.218	1.536	1.793	1.787
Δ24h débit	0.003	0.014	0.135	0.162	0.147
Δ48h débit	0.004	0.022	0.21	0.25	0.229
Δ72h débit	0.003	0.071	0.102	0.09	0.299
Marée (coefficient)	0.01	0.024	0.264	0.240	0.453
Pluviométrie (mm)	0.010	0.026	0.107	0.171	0.264
Pression atmosphérique	1.237	3.347	2.534	2.062	1.872
Luminosité lunaire (%)	0.073	0.208	1.148	1.025	1.654
Variable temporelle	0.004	0.111	0.681	0.742	0.705
Variable temporelle (degré II)	3.797	2.161	1.635	1.33	1.201

Tableau 1. Importance des variables prédictives (VIP) dans la projection du nombre de bulls du modèle PLSR à 5 composantes. Un VIP > 1 traduit une contribution forte de la variable. Abréviations : voir Fig. 6.

Le test jack réalisé sur le modèle à 5 composantes a montré que la température de l'eau, le débit, le temps et la variable temporelle polynomiale sont les variables qui influencent significativement le nombre de bulls (Tab. 2). Parmi ces prédicteurs, la température de l'eau a la plus grande influence positive sur le nombre de bulls et le débit la plus grande influence négative. En effet, lorsque la température augmente et que le débit baisse, le nombre de bulls vient à augmenter. Il semble important de noter que la variable polynomiale de température de l'eau n'est pas un bon prédicteur du nombre de bulls en 2023.

Prédicteurs	Estimate	Erreur standard	t value	Pr (> t)	Significativité
Température de l'eau (°C)	0.053	0.012958	4.0899	0.00048	***
Température de l'eau (degré II)	-0.367541	0.230	-1.5980	0.124309	
Δ24h température de l'eau	0.003265	0.021736	0.1502	0.881937	
Δ48h température de l'eau	0.024734	0.037762	0.655	0.519253	
Δ72h température de l'eau	0.0622898	0.057461	1.0946	0.285525	
Température de l'air (°C)	0.0655831	0.15781	0.4156	0.68175	
Débit (m ³ /s)	-2.984771	0.812207	-3.6749	0.001328	**
Δ24h débit	0.21625	0.125626	1.7214	0.099217	
Δ48h débit	0.304039	0.210662	1.4433	0.163037	
Δ72h débit	-0.198543	0.528193	-0.3759	0.710597	
Marée (coefficient)	0.031839	1.011658	0.0315	0.975176	
Pluviométrie (mm)	-0.398924	0.30975	-1.2879	0.211167	
Pression atmosphérique	0.049599	0.030783	1.6112	0.1211389	
Luminosité lunaire	-0.120769	0.412563	-0.2927	0.772471	
Variable temporelle	1.15055	0.297641	3.8656	0.000836	***
Variable temporelle (degré II)	-0.0243127	0.009367	-2.5955	0.016507	*

*p < 0.05 ; **p < 0.01 ; *** p < 0.001

Tableau 2. Résultats du test jack montrant les coefficients de régression du modèle à 5 composantes.

À partir de ce modèle PLSR, le nombre de bulls est prédit pour l'ensemble des nuits manquantes. La somme des résultats sur la totalité des nuits fournit une première estimation du nombre de bulls d'aloise feinte à Taillebourg pour la saison 2023 (Tab. 4). Elle s'élève à **4 935** bulls.

1.2.2. Prédiction des quarts d'heures manquants

Le nombre de bulls réalisé au cours des 14 quarts d'heure non dépouillés est lui aussi prédit à partir d'un GLM. L'ajustement d'un modèle poisson de régression polynomiale de degré 3 fournit l'AICc le plus faible ce qui semble être le modèle optimal pour exprimer le nombre cumulé de bulls en fonction de chaque quart d'heure. L'équation du modèle sert ensuite de base à l'interpolation du nombre de bulls cumulé sur la saison pour les 14 quarts d'heure manquants (Fig. 10).

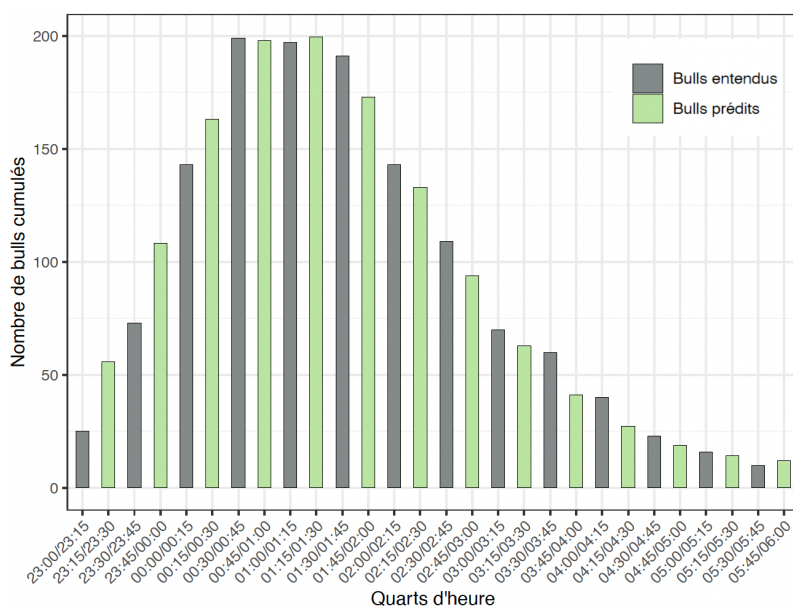


Figure 10. Nombre cumulé de bulls entendu sur les quarts d'heure dépouillés et prédit sur les quarts d'heure manquants pour la frayère de Taillebourg en 2023.

Un coefficient multiplicateur (Tab. 3) est calculé selon la formule (1), puis est appliqué à la première estimation du nombre total de bulls (Résultats, section 1.2.1.) (Tab. 4) pour donner une seconde estimation du nombre de bulls total sur la saison de reproduction 2023 à Taillebourg. En prenant en compte les quarts d'heure non dépouillés, le nombre total de bulls s'élève à **9 840** (Tab. 4).

$$(1) \text{ Coefficient} = \frac{\text{nombre cumulé de bulls observé total} + \text{nombre de bulls total prédit}}{\text{nombre cumulé de bulls observé total}}$$

	IC ₉₅	Estimation	IC ₉₅ [
Nombre cumulé de bulls prédit total	1178	1301	1439
Nombre cumulé de bulls observés total	/	1309	/
Coefficient multiplicateur	1.899	1.994	2.099

Tableau 3. Coefficient multiplicateur et IC₉₅ calculés à partir du nombre total de bulls cumulé entendu pendant les quarts d'heure dépouillés et prédit pour les quarts d'heures non dépouillés. Le nombre de bulls total cumulé observé n'est pas une estimation mais un résultat brut sans IC₉₅ (Résultats section 1.1.).

1.2.3. Calibration

Pour la saison 2023, 16 quarts d'heure de calibration ont eu lieu sur le terrain et 261 bulls ont été entendus en direct. Pour les mêmes quarts d'heure, un total de 168 bulls ont été entendus dans les enregistrements. La relation entre le nombre de bulls entendu sur le terrain et entendu sur les enregistrements construit par un modèle linéaire (Annexe 3) est significative (Test F = 135,7 ; p-value = 1.368e⁻⁸) avec un R² élevé de 0,91. La droite de régression obtenue ($y = 1,5974x - 0,4606$) est utilisée pour corriger la seconde estimation (Résultats, section 1.2.2.) en prenant en compte le nombre de bulls non perçu lors du dépouillement des enregistrements. Après calibration, on estime finalement à **15 716** le nombre total de bulls effectué en 2023 sur la frayère de Taillebourg (Tab. 4).

1.3. Estimation du nombre de géniteurs

En appliquant la formule algébrique (Matériels et Méthodes, section 5.2.) sur le résultat final du nombre de bulls (Tab. 4), on estime que la frayère de Taillebourg a accueilli un total de **3 143 géniteurs d'aloses feintes** en 2023.

Étapes	IC ₉₅	Estimation	IC ₉₅ [
Prédiction des nuits	3665	4935	6205
Prédiction des quarts d'heure	6960	9840	13024
Calibration	9281	15716	25217

Tableau 4. Nombre total de bulls estimé à Taillebourg pour la saison 2023. Il est déterminé par addition des comptages totaux quotidiens connus et interpolés (nuits sans comptage) pour chaque jour de la saison de reproduction. Le résultat est complété par le nombre de bulls effectué au cours des quarts d'heure non écoutés puis corrigé par calibration. Les IC₉₅ des deux dernières étapes sont calculés à partir de l'IC₉₅ des étapes précédentes.

2. Suivi qualitatif

Le suivi linéaire des frayères à aloses sur le bassin versant de la Charente a débuté la nuit du 27 avril 2023 et s'est achevé la nuit du 15 juin 2023, pour un total de 15 nuits de suivi assurées. Parmi les 41 frayères de la Charente, 24 sites ont été visités et une activité de reproduction a pu être observée sur 17 d'entre eux, répartis entre Saint-Savinien et Châteauneuf-sur-Charente (Fig. 11).

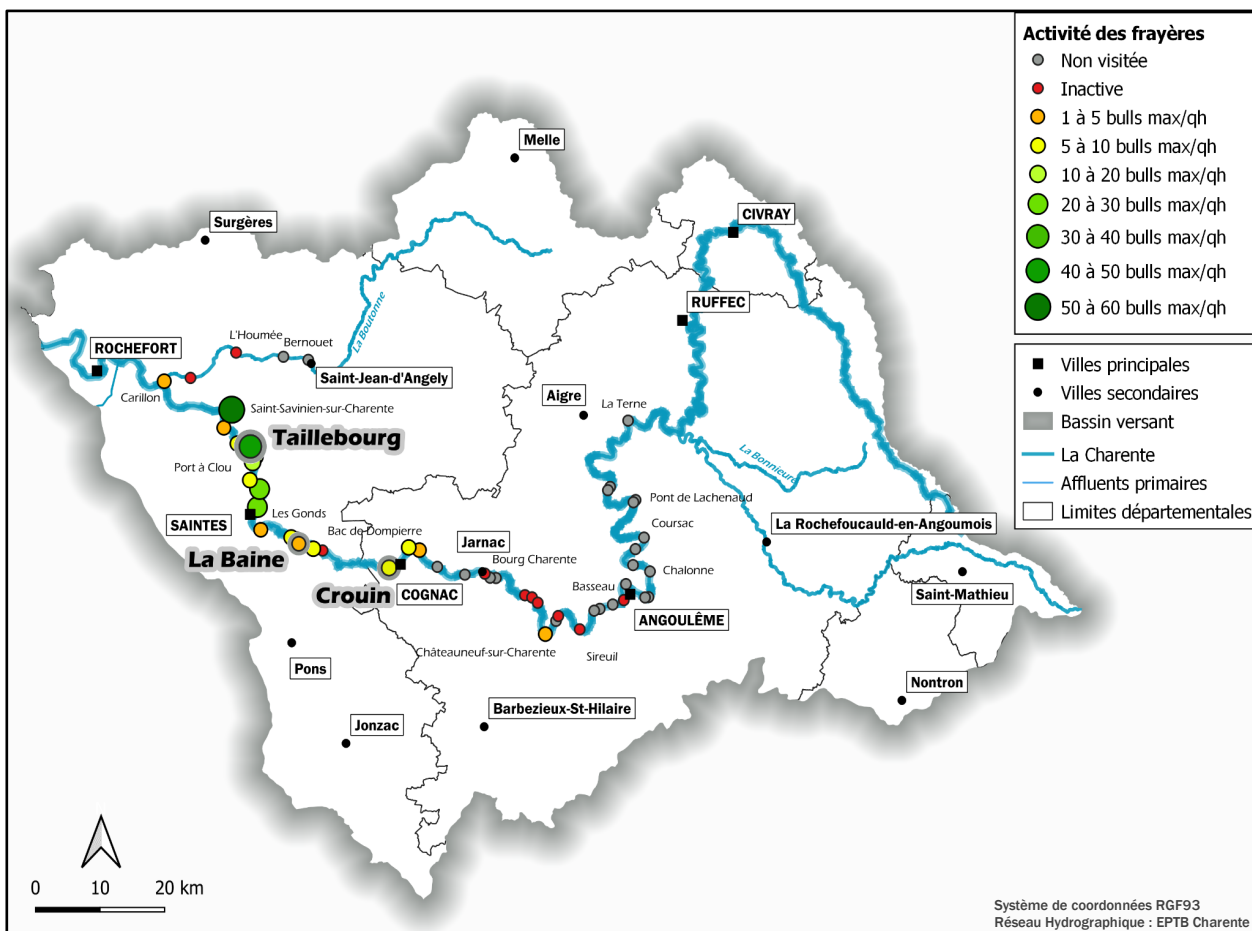


Figure 11. Cartographie de l'activité des frayères du bassin de la Charente en 2023

En aval de Cognac, la reproduction est effective sur l'ensemble des sites sauf le bac de Dompierre, bien qu'actif en 2022 (Annexe 4). Une très forte activité est observée sur les frayères de Saint-Savinien et Taillebourg avec plus de 40 à 60 bulls entendus en quinze minutes. Sur 8 sites visités en amont, on signale seulement un site actif, celui de Châteauneuf-sur-Charente. Cette frayère, comme toute la partie amont de Cognac, n'avait montré aucune activité en 2022. La même constatation est faite sur la Boutonne où seul le site de Carillon a « bullé » en 2023 à la différence de 2022.

3. Suivi du front de migration

Le suivi qualitatif de l'activité de reproduction a permis de localiser un premier front de colonisation des grandes aloses à Châteauneuf-sur-Charente. Au regard de cette information, la campagne de prospection terrain 2023 s'est organisée autour d'une dizaine de sorties terrains dont deux journées de navigation le long de la Charente entre Dompierre et Jarnac. Aucun indice de présence d'alose n'a été détecté au cours de ces actions. Le suivi de la pêche amateur n'a apporté aucune nouvelle actualité de la migration des grandes aloses. Cependant, une prise de contact avec un propriétaire informe de la présence de 4 cadavres de grandes aloses (Annexe 5) retrouvés dans les grilles d'une microcentrale électrique à Sireuil. Cette information place un nouveau front de migration en amont de Châteauneuf-sur-Charente.

Discussion

Le présent suivi avait pour but d'évaluer l'état annuel des populations d'aloses qui viennent se reproduire sur le bassin versant de la Charente. La surveillance de la migration et de l'activité des frayères est très importante étant donné l'urgence de quantifier les stocks de géniteurs, le succès de frai et la nécessité d'améliorer les connaissances sur le comportement des géniteurs.

1. Une reproduction modulée par des conditions environnementales particulières

À l'échelle du bassin versant, les suivis linéaires réalisés depuis 2010 permettent d'avoir une idée précise des sites de fraie de la grande alose et de l'alose feinte. Depuis le début des suivis, il apparaît de fortes différences concernant la répartition de l'activité de reproduction sur l'axe migratoire avec une forte activité en aval de Cognac et une activité moindre en amont. Cela est confirmé par la station de vidéo-comptage de Crouin où seulement 555 aloses ont été observées en passage. L'année 2023 est cependant marquée par l'activité de la frayère de Châteauneuf-sur-Charente et la découverte de 4 cadavres de grandes aloses à Sireuil, faisant de cette station le plus haut front de colonisation atteint par la grande alose depuis 2020. Ce front de migration est celui modélisé par l'EPTB Charente (2003) à partir des débits de la dernière quinzaine de mars, alors

qu'une modélisation basée sur les débits de début avril place un front de migration beaucoup plus en aval. Ainsi, l'avancée du front de migration est à mettre en relation avec une arrivée précoce des grandes aloses dans des débits avantageux de début de saison qui ont favorisé une gestion des niveaux d'eau propice à leur déplacements. Cela confirme les résultats de Legrand (2021) et des impacts du réchauffement climatique sur le comportement des aloses. Malgré tout, la nette disparité entre amont et aval réaffirme la rupture écologique que subit le fleuve Charente par la succession d'ouvrage en amont du bassin qui vient freiner la remontée de la grande alose, l'obligeant à se reproduire plus bas. Bien qu'équipés de passe à poissons, la franchissabilité de la plupart des ouvrages semble partiel. En particulier, des difficultés de gestion des clapets du barrage de Crouin ont, cette année, altéré l'attractivité de la passe à poisson. Piloté par la CMSC, un suivi télémétrique par marquage par émetteur RFID tente aujourd'hui de comprendre leurs comportement lors de la montaison sur la Charente afin d'orienter au mieux les modes de gestion et optimiser le fonctionnement des ouvrages.

Sur la frayère de Taillebourg, le stock reproducteur d'alse feinte peut être estimé à près de 3 142 individus en 2023. Ce chiffre est plus élevé qu'en 2022 mais reste plus faible qu'en 2021 où respectivement 2 039 et 4 035 individus ont été comptabilisés (Fig. 12). L'année 2023 est cependant la deuxième meilleure année d'estimation depuis 2017, date à partir de laquelle des chutes de géniteurs sont constatées annuellement.

L'ensemble des variations au cours des années semble être étroitement lié aux facteurs de température d'eau et de débit. En 2017 et 2022, des températures relativement hautes associées à de forts étiages observés sur toute la période de reproduction ont eu un impact négatif sur l'activité de reproduction et la remontée des aloses (Labedan, 2017 ; Gaudron, 2022). Ce constat n'est pas étonnant puisque les biologistes ont toujours démontré le lien

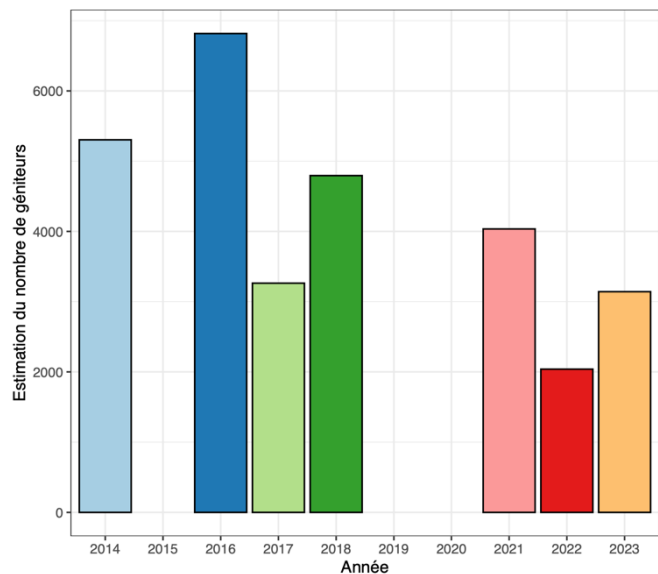


Figure 12. Estimation du nombre de géniteurs d'alse calculé par année depuis 2014

incontestable entre la température et tous les processus majeurs du cycle de vie (Hochachka & Somero, 2002 ; Rome, 2007). Avec une conductivité thermique élevée et une forte capacité thermique, les milieux aquatiques font que la température corporelle des organismes exothermiques, comme les poissons, est le reflet de la température de leur habitat (Angilletta, 2009). En conséquence, tous les aspects du comportement et de la physiologie de l'alse sont sensibles à la température, la rendant plus performante dans des plages de températures très spécifiques (Fry, 1971). Des

températures de l'eau respectivement inférieurs à 15°C et supérieurs à 23°C (Boisneau *et al.*, 1990 ; Aprahamian *et al.*, 2003) en début et fin de période auraient pour effet d'inhiber la reproduction des aloses alors que des températures intermédiaires la stimulerait. Au cours de ce suivi annuel, les températures relativement douces ont ainsi permis aux aloses d'initier la reproduction sans subir de rétro-inhibition significative. Aux vus de l'analyse des données antérieures, la vitesse du courant peut constituer un véritable facteur limitant de la reproduction (Baglinière *et al.*, 2003). La baisse de vitesse de l'eau due à des températures saisonnières hautes et une pluviométrie faible est susceptible d'affecter le comportement reproducteur. Il semble que des variations de débit peuvent modifier la typologie des frayères notamment la hauteur et les zones de courant ce qui les rendraient moins optimales pour la reproduction (Cassou-Leins & Cassou-Leins, 1981 ; Boisneau *et al.*, 1990). Cette année, les débits assez importants s'inscrivent dans un contexte très favorable pour la reproduction de l'aloise feinte sur la Charente. L'activité n'a donc nullement été impactée directement par les débits, qui ont seulement jouer le rôle d'initiateur.

Au cours de la saison de reproduction, la variation du nombre d'accouplements (bull) journalier observée sur la frayère de Taillebourg pourrait s'expliquer par une stratégie de ponte qui tend à favoriser la survie des juvéniles en fonction de la température et du courant. Lambert *et al.* ont d'ailleurs démontré que les géniteurs sont capables d'adapter leur ponte pour anticiper des conditions thermiques favorables aux embryons puisque les meilleurs taux de survie après l'éclosion ont été observées entre 16,6 °C et 24,8 °C (Jatteau *et al.*, 2017). La température peut être utilisée par les aloses comme des indices fiables de l'abondance de nourriture (McNamara & Houston, 2008). En effet, le régime alimentaire des larves d'aloises est principalement composé de zooplancton (Aprahamian *et al.*, 2003), qui émerge en fonction de la température et de la durée du jour. Pour leur éclosion, les œufs fécondés demandent d'être déposés par le courant sur un substrat de gravier en zone peu profonde (Aprahamian *et al.*, 2003). En conséquence, l'habitat des œufs dépend du débit qui, lors de fortes crues, entraîne les œufs hors de la zone propice choisie par les géniteurs. En 2023, des fortes crues ont été constaté mais seulement en début et fin de saison ce qui suggère qu'elles n'ont pas été prises en compte dans le comportement de ponte des aloses.

La saisonnalité des conditions environnementales dans les rivières comme la Charente peut expliquer la propension de l'aloise à se produire fin mai, lorsque les conditions sont favorables (McNamara & Houston, 2008). Ce résultat est cohérent avec la saisonnalité de frai décrite lors du suivi quantitatif 2023. Cependant, la règle n'est pas figée dans le temps mais dans les fluctuations environnementales et, par conséquent, des variations interannuelles du nombre d'accouplements et donc du nombre de géniteurs sont observées depuis 2017. Dans le contexte du réchauffement climatique, les effets deviennent encore plus perceptibles et un des défis majeurs est de prédire comment ce phénomène affectera l'abondance et la distribution des organismes (Hughes, 2000).

2. Des pressions qui évoluent

En dépit des conditions favorables de 2023, l'activité reste plus faible qu'auparavant, signe que d'autres pressions interviennent dans la dynamique de reproduction. En effet, le comportement des poissons n'est pas seulement influencé par la température ou le débit mais par une combinaison complexe de facteurs biotiques et abiotiques (Righton *et al.*, 2010). La migration en bancs et la reproduction des aloses en zones restreintes créent des circonstances avantageuses pour les prédateurs opportunistes (Garman et Macko, 1998 ; MacAvoy *et al.*, 1998), notamment les poissons de grande taille qui peuvent relier efficacement les réseaux alimentaires marins et dulçaquicoles. Depuis son introduction dans l'Est de la France en 1980, le silure d'Europe (*Silurus glanis*) est aujourd'hui la plus grande espèce européenne de poissons des eaux douces intérieures de l'ouest de l'Europe (Stone, 2007 ; Copp *et al.*, 2009). Des études antérieures ont démontré que sa présence sur la Loire (Belhamiti & Boisneau, 2015) ainsi que la Garonne et la Dordogne (Boulêtreau *et al.*, 2020) avait un fort impact sur les populations d'aloses venues se reproduire. Sur la Charente, le suivi annuel des aloses a mis en évidence une prédation des bulls qui a permis d'intégrer cette nouvelle problématique dans les protocoles de terrain à partir de 2019. Depuis, une augmentation du taux de prédation, du nombre d'individus observés et pêchés par les professionnels est constatée et sont autant d'indices qui démontrent une réelle expansion de l'espèce. Récemment, le silure a été capable de modifier son comportement de chasse en concentrant son action au niveau des barrages pour consommer les migrateurs en attente du passage de l'obstacle. C'est d'autant plus vrai sur le site du barrage de Crouin où il a été établi une diminution de la fréquentation de la passe à poisson par les aloses corrélées à la présence des silures (Labedan, 2017). Cette année encore, le constat est sans appel avec une augmentation radicale du nombre de silures identifiés à la station de vidéo-comptage de Crouin qui est passé d'une dizaine en 2017 à 155 en 2023. Pour tenter de minimiser la menace du silure, une expérimentation d'effarouchement par pêche nocturne a été entreprise pendant la saison 2023. Bien que les premiers résultats semblent attester d'une légère diminution du taux de prédation des bulls, les silures ont montré une capacité d'adaptation incroyable qui leur permet de détecter un leurre lancé et rester éloigné. Par sa présence dans l'habitat, le silure affecte directement le succès de la reproduction de l'alose et induit un stress qui affecte la condition physique des individus. et, par conséquent, la dynamique de la population par des effets non-consommateurs (Boulêtreau *et al.*, 2020).

De surcroît, l'habitat de reproduction doit faire face à la présence d'autres espèces invasives comme les corbicules, qui sont considérées comme le groupe de bivalve filtreur le plus invasif au monde. *Corbicula fluminea* (O.F. Müller, 1774) est même reconnu comme l'une des espèces exotiques envahissantes les plus importantes dans les écosystèmes aquatiques d'eau douce (McMahon, 2002 ; Sousa *et al.*, 2008). En France, les corbicules ont réussi à coloniser la totalité des

principaux bassins hydrographiques Français (Brancotte & Vincent, 2002). Avec une capacité de filtration exceptionnelle associée à d'excellents potentiels de dispersion et de croissance, les corbicules peuvent conditionner les écosystèmes aquatiques et l'ensemble des communautés benthiques qui interviennent au sein de la chaîne trophique du milieu comme production primaire. Ainsi, lorsque les corbicules sont abondantes, la filtration de la colonne d'eau entraîne une baisse significative des concentrations en particules avec une réduction de la biomasse phytoplanctonique (Beaver *et al.*, 1991, Rong *et al.*, 2021, Hesse *et al.*, 2015), qui peut se répercuter sur la biomasse zooplanctonique (Pigneur *et al.*, 2014) et ses consommateurs. Sous l'action des corbicules, le flux de nutriment de la colonne d'eau et la concentration en oxygène dissous peuvent aussi diminuer très fortement par respiration benthique (Cerco & Noel, 2010 ; Rong *et al.*, 2021, Newell *et al.*, 2005). En résulte un amoindrissement du milieu de vie des poissons y compris des aloses et alosons dont l'activité et la croissance sont dépendantes de la disponibilité en ressources. Avec des conditions environnementales aggravantes, une raréfaction des proies peut conduire à une baisse de recrutement par la hausse du taux de mortalité des juvéniles.

3. Estimation du nombre de géniteur : un indicateur utile mais sensible

Les indicateurs sont définis comme des variables, des pointeurs ou des indices d'un phénomène biologique (Garcia *et al.*, 2000) et sont largement utilisés dans les études environnementales, la recherche et l'aide à la gestion (Spellerberg, 2005). Dans le contexte des poissons migrateurs, l'estimation du nombre de géniteurs est un indicateur important qui caractérise la santé, le fonctionnement et la dynamique des populations d'aloses sur la base de l'abondance du phénomène de reproduction. Son intérêt est d'autant plus significatif lorsque les suivis annuels fournissent une chronique de données suffisamment longue pour refléter et comprendre les variations interannuelles. La manière dont l'indicateur est aujourd'hui obtenu, avec la prise en compte d'un nombre important de variables environnementales, permet de le considérer comme un indicateur sensible directement et indirectement au niveau de stress subit par l'ensemble de l'écosystème aquatique local. De la même façon, il s'agit d'un indicateur peut être trop sensible, basé sur des résultats théoriques subjectifs et des données prédites. Même s'il est parfaitement admis que les populations d'alose montrent naturellement de fortes fluctuations avec une variation du succès reproducteur (Boisneau *et al.*, 2008), la fiabilité des estimations peut être en partie discuté.

La méthode d'échantillonnage utilisée pour le suivi quantitatif de la reproduction est adoptée depuis environ 10 ans par la CMCS et tente d'être le plus représentatif possible du comportement des aloses. Cependant, l'effort d'échantillonnage n'a pas été strictement identique en fonction des années. Cette variation concerne le nombre d'enregistrements par semaine, par mois et par saison ainsi que le nombre de calibrations et les dates de début et fin de suivi. La précision, les biais et les intervalles

de confiance relatifs à la prédiction des données manquantes sont pourtant susceptibles de limiter les performances de l'estimateur (Walther & Morand, 1998 ; Walther & Moore, 2005). Une standardisation du niveau d'effort entre les années et les mois avec un rythme d'échantillonnage maximum et systématique dans la saison doit être mise en place afin d'harmoniser le suivi et fiabiliser l'indicateur. Les phases de calibration devraient être effectuées par le même opérateur sur une période de forte activité et assez fréquemment, afin d'améliorer la représentativité des résultats.

L'estimation du nombre de géniteurs est aussi très dépendante de la méthode statistique appliquée et du mode de calcul. L'approche par modélisation PLSR et GLM reste identique depuis son initiation en 2014 et impose son maintien pour une comparaison fiable des résultats. Cette année, des modifications ont tout de même été apportées et d'autres modélisations ont été testées. Une prédiction des données manquantes à partir de modèle GLM exclusivement, fournit des estimations semblables mais des marges d'erreurs plus faibles. Cela reste compréhensible quand l'on sait que la régression PLSR conserve la totalité des variables explicatives pour exprimer la variation du nombre de bulls. Le but est maintenant de savoir s'il est vraiment utile de prendre en compte la totalité des variables ou seulement celles qui semblent avoir le plus d'effet sur la reproduction. Une caractérisation du comportement de reproduction de l'aloise sur le bassin de la Charente serait intéressante à réaliser. Cela serait aussi l'occasion de reconsidérer la méthode de calcul du nombre total de géniteurs sous les hypothèses proposées par Cassou-Leins *et al.* (2000) qui se basent sur des constantes biologiques rarement vérifiées, estimées sur d'autres populations d'aloses que celles de la Charente et qui peuvent montrer de fortes variations (Veron *et al.*, 2003 ; Acolas *et al.*, 2004 ; Mennesson-Boisneau *et al.*, 2000 ; Sabatié, 1993). Ainsi, le sexe-ratio, le nombre de ponte et la fidélité des reproducteurs à une seule frayère devraient être réévalués.

Avec maintenant près de 10 ans de données sur certains sites, le suivi de la reproduction sur le bassin de la Charente reste indispensable pour évaluer l'évolution de la population d'aloise à l'échelle du bassin. Il faut garder à l'esprit que les attributs biologiques ne sont pas toujours directement mesurables et que les indicateurs peuvent servir de substitut synthétique à la structure et au fonctionnement des espèces (Fulton *et al.*, 2004) dans un système ouvert très variable qu'il est difficile d'appréhender dans le temps et l'espace. Le couplage de plusieurs indicateurs peut être la réponse au manque de robustesse de l'indicateur unique (Shin *et al.*, 2005). Un indicateur alon obtenu par un suivi de pêche sur la Charente est actuellement en élaboration pour apporter des informations complémentaires sur la qualité des habitats et la dynamique des aloses qui dépend fortement du succès de survie des premiers stades de vie (Hjort, 1926 ; Toresen & Østvedt, 2000 ; Brunel & Boucher, 2006).

Bibliographie

- Acolas, M. L., et al.** (2006). Upstream migration and reproductive patterns of a population of allis shad in a small river (L'Aulne, Brittany, France). *ICES Journal of Marine Science*, 63(3), 476-484. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.05.022>
- Akaike, H.**, (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Alerstam, T., et al.** (2003). Long-distance migration : Evolution and determinants. *Oikos*, 103(2), 247-260. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12559.x>
- Assis, CA.**, (1990). Threats to the survival of anadromous fishes in the River Tagus, Portugal. *J Fish Biol* 27(Suppl A):225–226
- Alexandrino, P., et al.** (2006). Interspecific differentiation and intraspecific substructure in two closely related clupeids with extensive hybridization, *Alosa alosa* and *Alosa fallax*. *Journal of Fish Biology*, 69(sb), 242-259. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01289.x>
- Angilletta Jr., M. J.** (2009). *Thermal Adaptation*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198570875.001.1>
- Aprahamian, M. W. & Aprahamian, C. D.** (2001). The influence of water temperature and flow on year class strength of twaite shad (*alosa fallax fallax*) from the river severn, england. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 362-363, 953-972. <https://doi.org/10.1051/kmae:2001030>
- Aprahamian, M. W., et al.** (2003). Biology, Status, and Conservation of the Anadromous Atlantic Twaite Shad *Alosa fallax fallax*.
- Baglinière, J.-L., et al.** (2003). The Allis Shad *Alosa alosa*: Biology, Ecology, Range and Status of Populations. Biology, Status and Conservation of the World's Shads, 35, *American Fisheries Society*. 1-888569-51-4. [hal-02832505](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02832505)
- Baudoin, J.-M., et al.** (2014). Évaluer le franchissement des obstacles par les poissons. *Principes et méthodes*. ONEMA
- Beaver, J. R., et al.** (1991). Grazing Effects of an Exotic Bivalve (*Corbicula fluminea*) on Hypereutrophic Lake Water. *Lake and Reservoir Management*, 7(1), 45-51. <https://doi.org/10.1080/07438149109354253>
- Belhamiti, N. & Boisneau, C.** (2015). *Silurus* : Étude du silure à l'échelle de la Loire en région Pays de la Loire. [Rapport de recherche] Université de Tours. Région Centre, CR pays de la Loire. [hal-02175556](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02175556)
- Bensettiti, F. & Gaudillat, V.** (2004). Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 7. Espèces animales. *La Documentation française*. 353 pp.

- Blanc, M., et al.** (1971). European inland water fish. A multilingual catalogue. FAO, *Fishing News Books*, London.
- Boisneau, P., et al.** (1990). Description d'une frayère et comportement de reproduction de la grande Alose (*Alosa alosa L.*) dans le cours supérieur de la Loire. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 316, 15-23. <https://doi.org/10.1051/kmae:1990022>
- Boulêtreau, S., et al.** (2021). "The giants' feast" : Predation of the large introduced European catfish on spawning migrating allis shads. *Aquatic Ecology*, 55(1), 75-83. <https://doi.org/10.1007/s10452-020-09811-8>
- Brancotte, V., & Vincent, T.** (2002). L'invasion du réseau hydrographique français par les mollusques *corbicula spp.* modalité de colonisation et rôle prépondérant des canaux de navigation. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 365-366, 325-337. <https://doi.org/10.1051/kmae:2002038>
- Brias, T.** (2014). Suivi alose 2014 : Ajustement du protocole de suivi et du calcul d'estimation des géniteurs d'aloses sur le bassin Charente. Rapport de stage.
- Brunel, T., & Boucher, J.** (2006). Pattern of recruitment variability in the geographical range of the exploited northeast Atlantic fish species. *Journal of Sea Research*, 55(2), 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2005.07.003>
- Bry, C., Hoflack, P.** (2004). Le bassin versant de la Charente : une illustration des problèmes posés par la gestion quantitative de l'eau. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 2004, 52 (52), pp.81-96. [hal-01199434](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01199434)
- Carrascal, L. M., et al.** (2009). Partial least squares regression as an alternative to current regression methods used in ecology. *Oikos*, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2008.16881.x>
- Cassou-Leins, F., Cassou-Leins, J.J.** (1981). Recherches sur la biologie et l'halieutique des migrateurs de la Garonne et principalement de l'Alose, *Alosa alosa L.* Thèse doctorat 3^e cycle, *Institut National Polytechnique de Toulouse*, 382p.
- Cassou-Leins, F., Cassou-Leins, J.J.** (1985). Étude de la frayère d'aloses. Rap. ENSA Toulouse, 12 p.
- Cassou-Leins, F., Cassou-Leins, J.J.** (1986). Étude de la reproduction de l'Alose. Rap. ENSA Toulouse, 12 p.
- Cassou-Leins, F., Cassou-Leins, J.J.** (1988). Suivi de la réserve naturelle de la frayère d'aloise. Année 1988. DEE, ENSA Toulouse, 12 p.
- Cassou-Leins, J. J., et al.** (2000). La reproduction. In Les aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax spp.*): Ecobiologie et variabilité des populations (Baglinière, J. L. & Elie, P., eds). *Institute Nationale de la Recherche Agronomique (INRA)*.
- Cederholm, C. J., et al.** (1999). Pacific Salmon Carcasses : Essential Contributions of Nutrients and Energy for Aquatic and Terrestrial Ecosystems. *Fisheries*, 24(10), 6-15. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1999\)024<0006:PSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1999)024<0006:PSC>2.0.CO;2)

- Cellule Migrateurs Charente Seudre.** (2022). Rapport des actions 2021. Programme d'actions 2021-2025 pour la sauvegarde et la restauration des poissons migrateurs amphihalins sur les bassins Charente et Seudre. EPTB Charente, MIGADO, CAPENA. 114 pages.
- Cerco, C. F., & Noel, M. R.** (2010). Monitoring, modeling, and management impacts of bivalve filter feeders in the oligohaline and tidal fresh regions of the Chesapeake Bay system. *Ecological Modelling*, 221(7), 1054-1064. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.07.024>
- Chanseau, M., et al.** (2004). Essai d'évaluation du stock de géniteurs d'alose *Alosa alosa* du bassin versant Gironde Garonne Dordogne sur la période 87-2001 et comparaison de différents indicateurs d'abondance. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 374, p.1– 19.
- Communauté Economique Européenne.** (1992). Directive 92/43/CEE du 21 mai 1992 concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages. *Official Journal L 206*, 22/07/1992 P. 0007-0050.
- Copp, G. H., et al.** (2009). Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges. *Fish and Fisheries*, 10(3), 252-282. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00321.x>
- Costa-Dias, S., et al.** (2009). The decline of diadromous fish in Western Europe inland waters : Mains causes and consequence.
- Coynel A., et al.** (2012). Spatial Cadmium Distribution in the Charente Watershed and Potential Risk Assessment for the Marennes Oleron Bay (Southwest France). In Y. Luo, *Novel Approaches and Their Applications in Risk Assessment*. InTech. <https://doi.org/10.5772/38897>
- Cushman, S. A., et al.** (2008). Parsimony in landscape metrics : Strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators*, 691-703. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.12.002>
- Dingle, H., & Drake, V. A.** (2007). What Is Migration? *BioScience*, 57(2), 113-121. <https://doi.org/10.1641/B570206>
- Douchement, C.** (1981). Les aloses des fleuves français *Alosa fallax* (Lacepède, 1803) et *Alosa* (alosa Linne, 1758) – Biometrie, écobiologie : autonomie des populations. Thèse de doctorat, *Université des sciences et techniques du Languedoc*, Montpellier.
- Drouineau, H., et al.** (2018). Freshwater eels : A symbol of the effects of global change. *Fish and Fisheries*, 19(5), 903-930. <https://doi.org/10.1111/faf.12300>
- Duquesne, A., et al.** (2020). Trajectoire d'évolution d'un cours d'eau à très faible énergie : Le cas de la Charente entre Angoulême et Saintes (Ouest de la France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 26(2), 97-115. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.14411>
- EPTB Charente.** (2003). Étude des potentialités piscicoles des bassins de la Charente et de la Seudre pour les poissons migrateurs. Rapport 2000-2003. Hydro-Concept. 38p.
- EPTB Charente.** (2012). SAGE Charente – État initial. Angoulême, 47 p.
- Figge, F.** (2004). Bio-folio : Applying portfolio theory to biodiversity. *Biodiversity and Conservation*, 13(4), 827-849. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000011729.93889.34>

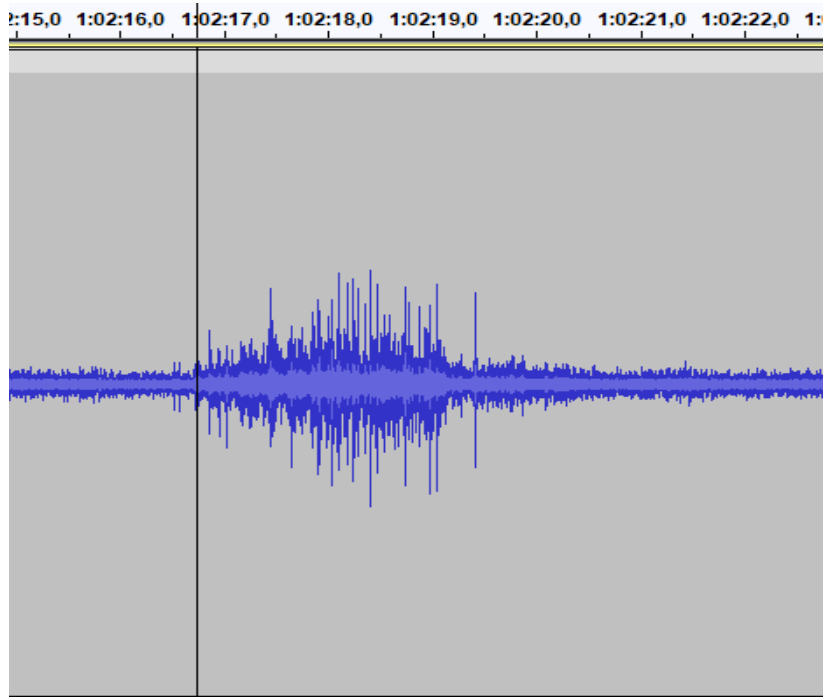
- Fry, F. E. J.** (1971). The Effect of Environmental Factors on the Physiology of Fish. In *Fish Physiology* (Vol. 6, p. 1-98). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(08\)60146-6](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(08)60146-6)
- Fulton, E., et al.** (2005). Which ecological indicators can robustly detect effects of fishing? *ICES Journal of Marine Science*, 62(3), 540-551. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.12.012>
- Gallois, C.** (1946). L'aloise du Rhône. *Bulletin Français de Pisciculture*, 141, 162-176. <https://doi.org/10.1051/kmae:1946010>
- Garcia, S. M., & Staples, D. J.** (2000). Sustainability reference systems and indicators for responsible marine capture fisheries : A review of concepts and elements for a set of guidelines. *Marine and Freshwater Research*, 51(5), 385. <https://doi.org/10.1071/MF99092>
- Garman, G. C., & Macko, S. A.** (1998). Contribution of Marine-Derived Organic Matter to an Atlantic Coast, Freshwater, Tidal Stream by Anadromous Clupeid Fishes. *Journal of the North American Benthological Society*, 17(3), 277-285. <https://doi.org/10.2307/1468331>
- Gaudron, M.** (2022). Suivi aloise 2023. Rapport de stage.
- Gdcsf**, (2022-2027). Plan de Gestion des Poissons Migrateurs Garonne Dordogne Charente Seudre Leyre.
- Germaine, M.-A., & Barraud, R.** (2013). Restauration écologique et processus de patrimonialisation des rivières dans l'Ouest de la France. *Vertigo*, Hors-série 16. <https://doi.org/10.4000/vertigo.13583>
- Guillerault, N., et al.** (2015). Does the non-native European catfish *Silurus glanis* threaten French river fish populations? *Freshwater Biology*, 922-928. <https://doi.org/10.1111/fwb.12545>
- Hendry, A. P., et al.** (2004). The evolution of philopatry 751 and dispersal: homing versus straying in salmonids. Oxford, New York. pp. 52-91.
- Hesse, A.-S., et al.** (2015). Historique de propagation de la 581 corbicule, *Corbicula fluminea* (Bivalvia: Corbiculidae), en région Centre.
- Hjort, J.** (1926). Fluctuations in the year classes of important food fishes. *ICES Journal of Marine Science*, 1(1), 5-38. <https://doi.org/10.1093/icesjms/1.1.5>
- Hochachka, P. W. & Somero, G. N.** (2002) Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution. *Oxford University Press*, New York
- Hossain, M. S., et al.** (2016). Habitats across the life cycle of hilsa shad (*Tenualosa ilisha*) in aquatic ecosystem of Bangladesh. *Fisheries Management and Ecology*, 23(6), 450-462. <https://doi.org/10.1111/fme.12185>
- Hughes, L.** (2000). Biological consequences of global warming : Is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 56-61. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01764-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01764-4)
- UICN Comité français, MNHN, SFI & AFB** (2019). La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Poissons d'eau douce de France métropolitaine. Paris, France.
- IUCN.** (2008). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2008-2.

- Jatteau, P., et al.** (2017). Thermal tolerance of allis shad (*Alosa alosa*) embryos and larvae : Modeling and potential applications. *Aquatic Living Resources*, <https://doi.org/10.1051/alr/2016033>
- Keefer, M. L., & Caudill, C. C.** (2014). Homing and straying by anadromous salmonids : A review of mechanisms and rates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(1), 333-368. <https://doi.org/10.1007/s11160-013-9334-6>
- Keith, P., et al.** (2020). *Les Poissons d'eau douce de France*. Deuxième édition. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris ; Biotope, Mèze, 704 p. (Inventaires & biodiversité ; 18).
- Larinier, J.P., et al.** (1994). Passes à poissons : expertise, conception des ouvrages de franchissement. CSP, pp.336, Coll. ⟨hal-02576509⟩
- Lassalle, G., et al.** (2008). Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues : An approach using biogeographical models. *Biological Conservation*, 141(4), 1105-1118. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.02.010>
- Le Corre, M.** (1999). Éco-biologie et génétique des populations d'aloses (*Alosa fallax spp.*) de la Méditerranée.
- Lebedan, M.** (2017). Estimation du nombre de géniteurs d'aloses sur le bassin versant de la Charente et suivi des migration. Rapport de stage.
- Lelek, A.** (1980). Les poissons d'eau douce menacés en Europe. *Collection sauvegarde de la nature*, volume 18. Conseil de l'Europe, Strasbourg, France.
- Limburg, K. E., & Waldman, J. R.** (2009). Dramatic Declines in North Atlantic Diadromous Fishes. *BioScience*, 59(11), 955-965. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.7>
- Louisy, P.** (2013). *Poissons d'eau douce* ([Nouvelle éd.]). Milan.
- Lovett, G. M., et al.** (2007). Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 253-260. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[253:WNEM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[253:WNEM]2.0.CO;2)
- MacAvoy, S. E., et al.** (2001). Isotopic turnover in aquatic predators : Quantifying the exploitation of migratory prey. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(5), 923-932. <https://doi.org/10.1139/f01-045>
- Martin, T. G., et al.** (2017). Timing of Protection of Critical Habitat Matters. *Conservation Letters*, 10(3), 308-316. <https://doi.org/10.1111/conl.12266>
- McDowall, R. M.** (1989). Fish Migration Diadromy in Fishes : Migrations between Freshwater and Marine Environments. *BioScience*, 565-566. <https://doi.org/10.2307/1310981>
- McMahon, R. F.** (2002). Evolutionary and physiological adaptations of aquatic invasive animals : R selection versus resistance. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59(7), 1235-1244. <https://doi.org/10.1139/f02-105>
- Newell, R. I. E., et al.** (2005). Influence of Eastern Oysters on Nitrogen and Phosphorus Regeneration in Chesapeake Bay, USA, *The Comparative Roles of Suspension-Feeders in Ecosystems* (Vol. 47, p. 93-120). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/1-4020-3030-4_6

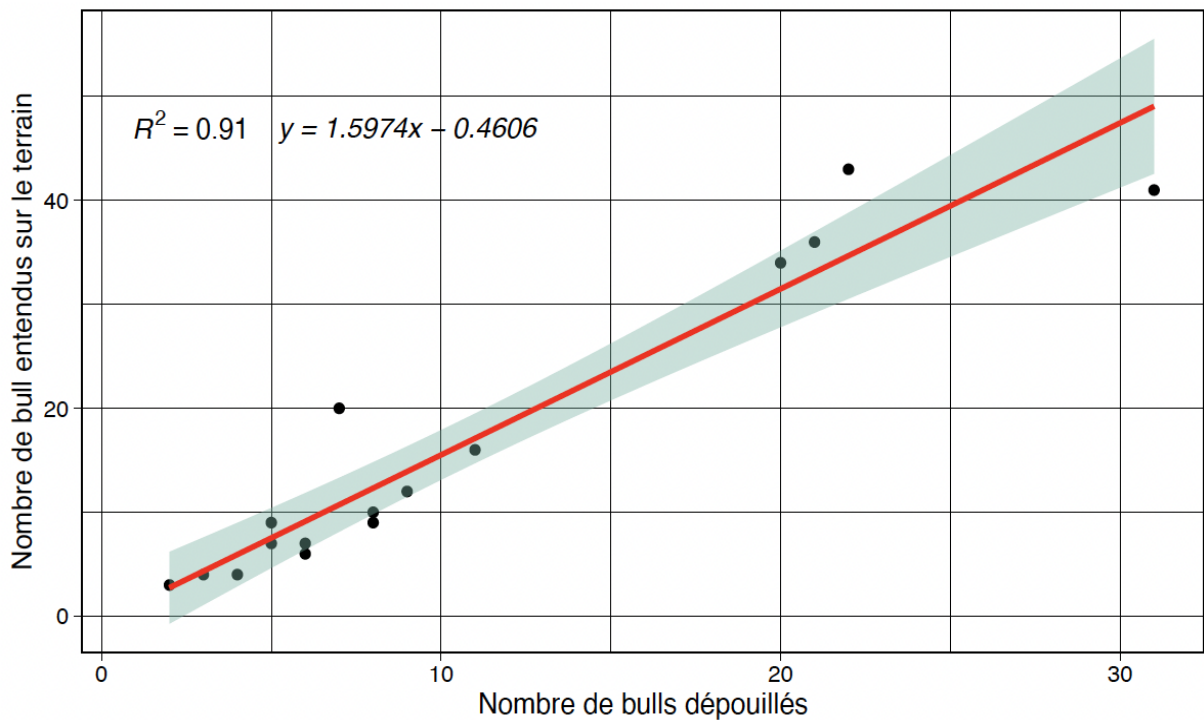
- Nichols, J., & Williams, B.** (2006). Monitoring for conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(12), 668-673. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.08.007>
- Northcote, T. G.** (1984). Mechanisms of Fish Migration in Rivers. *Mechanisms of Migration in Fishes* (p. 317-355). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2763-9_20
- Prouzet, P., et al.** (1994). Caractérisation biologique et variation des captures de la grande alose (*Alosa alosa*) par unité d'effort sur le fleuve Adour (Pyrénées Atlantiques, France). *Aquatic Living Resources*, 7(1), 1-10. <https://doi.org/10.1051/alr:1994001>
- Quignard, J.-P. and C. Douchement.** (1991). *Alosa alosa* (Linnaeus 1758). p. 89-126. In H. Hoestlandt. *The freshwater fishes of Europe*. Vol. 2. Clupeidae, Anguillidae.
- R Core Team.** (2019). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rome, L. C.** (2007). The effect of temperature and thermal acclimation on the sustainable performance of swimming scup. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1487), 1995-2016. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2083>
- Rong, Y., et al.** (2021). Effects of the Filter-Feeding Benthic Bivalve *Corbicula fluminea* on Plankton Community and Water Quality in Aquatic Ecosystems : A Mesocosm Study. *Water*, 13(13), 1827. <https://doi.org/10.3390/w13131827>
- Sabatié, M. R.** (1993). Recherches sur l'écologie et la biologie des aloses au Maroc (*Alosa Alosa* Linne, 1758 et *Alosa Fallax* Lacépède, 1803) : exploitation et taxinomie des populations atlantiques : bioécologie des aloses de l'Oued Sebou.
- Schlosser, I.J., and Angermeier, P.L.** (1990). The influence of environmental variability, resource abundance, and predation on juvenile cyprinid and centrarchid fishes. *Pal. Arch. Hydrobiol.* 37:265528
- Shin, Y.-J., et al.** (2005). Using size-based indicators to evaluate the ecosystem effects of fishing. *ICES Journal of Marine Science*, 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.01.004>
- Sousa, R., et al.** (2008). Ecology of the invasive Asian clam *Corbicula fluminea* (Müller, 1774) in aquatic ecosystems : An overview. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 44(2), 85-94. <https://doi.org/10.1051/limn:2008017>
- Spellerberg, I. F.** (2005). *Monitoring ecological change* (2nd ed). Cambridge University Press.
- Stone, R.** (2007). The Last of the Leviathans. *Science*, 316(5832), 1684-1688. <https://doi.org/10.1126/science.316.5832.1684>
- Syväranta, J., et al.** (2010). Dietary breadth and trophic position of introduced European catfish *Silurus glanis* in the River Tarn (Garonne River basin), southwest France. *Aquatic Biology*, 8, 137-144. <https://doi.org/10.3354/ab00220>
- Taverny, C.,** (1991) Contribution à la connaissance de la dynamique des populations d'aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax*) dans le système fluvio-estuarien de la Gironde : Pêche, biologie,

écologie. Étude particulière de la dévalaison et de l'impact des activités humaines. Doctorat Biologie des populations et écosystèmes, Université de Bordeaux I,

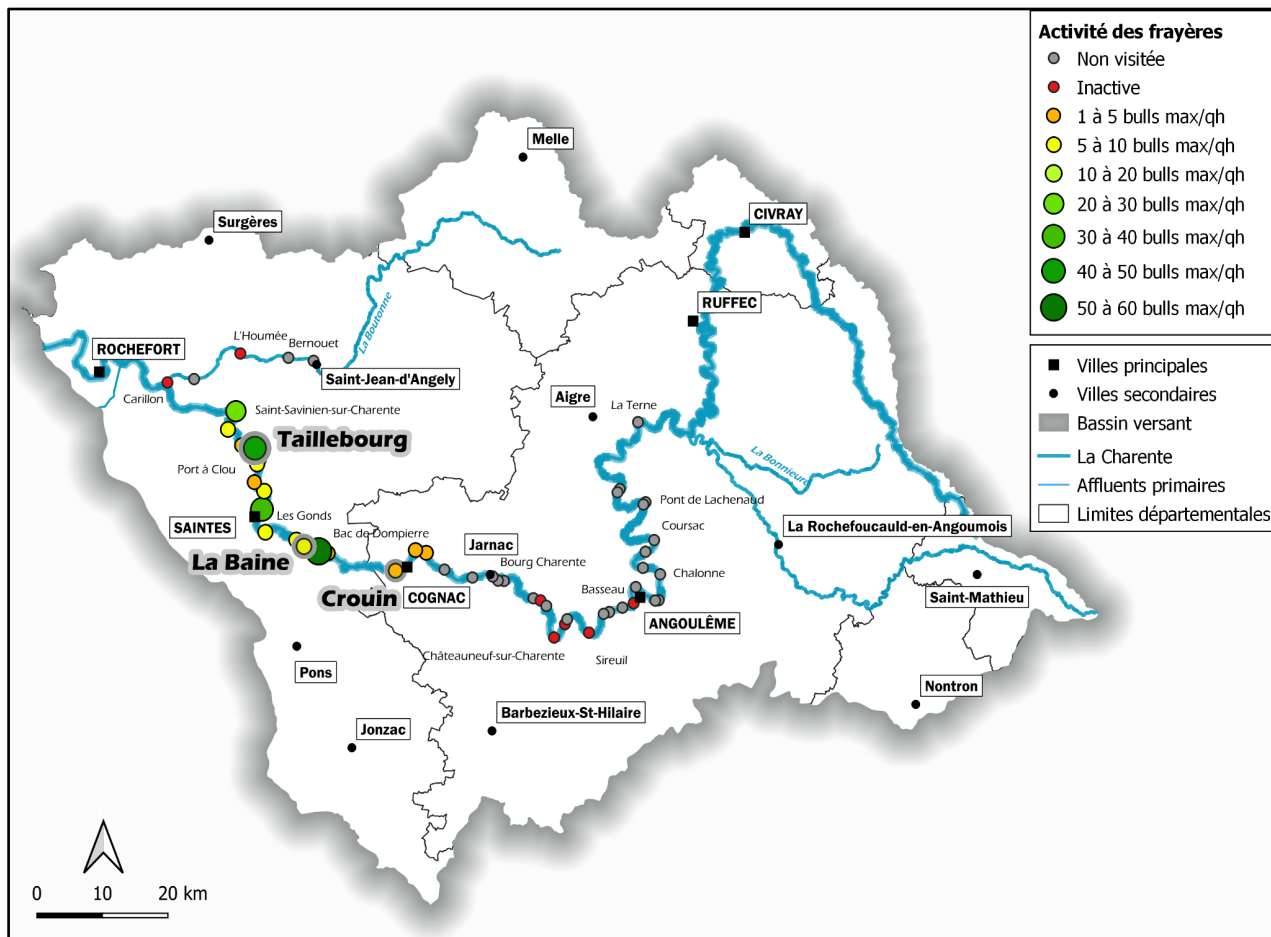
- Taverny, C., et al.** (2000). From the egg to the adult at sea. Les aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax* spp.) : écobiologie et variabilité des populations, pp.93-124. {hal-02582550}
- Thomas, O., & Germaine, M.A.** (2018). De l'enjeu de conservation au projet de territoire : Le saumon atlantique au cœur des débats. *Vertigo*, Volume 18 numéro 2. <https://doi.org/10.4000/vertigo.22259>
- Toresen, R., & Østvedt, O. J.** (2008). Variation in abundance of Norwegian spring-spawning herring (*Clupea harengus*, *Clupeidae*) throughout the 20th century and the influence of climatic fluctuations. *Fish and Fisheries*, 1(3), 231-256. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2000.00022.x>
- Turner, S. M., & Limburg, K. E.** (2012). Comparison of Juvenile Alewife Growth and Movement in a Large and a Small Watershed. *Marine and Coastal Fisheries*, 4(1), 337-345. <https://doi.org/10.1080/19425120.2012.675974>
- Vernier, F., et al.** (2010). Modelling scenarios of agriculture changes on freshwater uses and water quality at a large watershed scale: the case of the Charente watershed (France). International congress on environmental modelling and software, Ottawa, Canada. 9p. hal-00546884.
- Véron, V., et al.** (2001). Première caractérisation morphologique, biologique et génétique des populations de grande alose (*alosa alosa*) et d'alose feinte (*alosa fallax* spp.) de la charente (france). *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 362-363, 1037-1057. <https://doi.org/10.1051/kmae:2001035>
- Waldman, J., et al.** (2016). A Resilience Approach Can Improve Anadromous Fish Restoration. *Fisheries*, 41(3), 116-126. <https://doi.org/10.1080/03632415.2015.1134501>
- Walther, B. A., & Moore, J. L.** (2005). The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. *Ecography*, 28(6), 815-829. <https://doi.org/10.1111/j.2005.0906-7590.04112.x>
- Walther, B. A., & Morand, S.** (1998). Comparative performance of species richness estimation methods. *Parasitology*, 116(4), 395-405. <https://doi.org/10.1017/S0031182097002230>
- Whitehead, P. J. P.** (1985). Clupeoid fishes of the world (Suborder Clupeoidei). An annotated and illustrated catalogue of the herrings, sardines, pilchards, sprats, anchovies and wolf-herrings. FAOFisheries Synopsis 125(7). Thèse, 190 p. ENSA Rennes
- Wold, S.** (1978). Cross-Validatory Estimation of the Number of Components in Factor and Principal Components Models. *Technometrics*. <https://doi.org/10.1080/00401706.1978.10489693>
- Wold, S., et al.** (1989). Nonlinear PLS modeling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 53-65. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80111-X](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80111-X)
- Zydlewski, J., & Wilkie, M. P.** (2012). Freshwater to Seawater Transitions in Migratory Fishes. In *Fish Physiology* (Vol. 32, p. 253-326). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396951-4.00006-2>



Annexe 2. Signaux acoustiques classiques d'un bruit de bull enregistrés le 05/06/2023 et analysés sur le logiciel Audacity©



Annexe 3. Relation entre le nombre de bull entendu directement sur le terrain et le nombre de bull entendu sur les enregistrements dépouillés.



Annexe 4. Cartographie de l'activité de reproduction des frayères du bassin versant de la Charente en 2022



Annexe 5. Photographie des 4 cadavres de grandes aloses retrouvés dans les grilles de la centrale électrique à Sireuil. La taille ainsi que la localisation des individus ont permis leur identification. Source : Gérard Melly.

Résumé / Abstract

Les populations de poissons grands migrateurs ont fortement diminuées depuis le XX^e siècle. Les aloses feintes et les grandes aloses étaient présentes en nombre le long de la côte Atlantique et des grands fleuves. La restriction de leur aire de répartition ainsi que leurs statuts de protection internationaux exigent des États concernés qu'ils prennent des dispositions pour assurer la conservation des populations et des habitats, en accordant une attention particulière à l'évaluation des effectifs et des pressions environnementales dommageables. Un suivi de la reproduction des aloses effectué annuellement dans le bassin versant de la Charente fournit des indices qualitatifs et quantitatifs de la dynamique des populations sur le fleuve Charente. Le dénombrement de géniteurs sur la frayère de Taillebourg à partir d'un échantillonnage non invasif sert d'indicateur numérique et est mis en relation avec les facteurs abiotiques du milieu de fraie. En 2023, une estimation statistique par PLSR démontre que 3 143 géniteurs d'aloise feinte sont venus se reproduire sur la frayère de Taillebourg contre 2 107 en 2022. L'activité de reproduction suit une variation temporelle forte et semble étroitement liée à la température de l'eau et au débit. Les résultats portent à croire que les conditions climatiques relativement pluvieuses et douces de la saison 2023 ont fourni aux aloses une situation de migration et de reproduction particulièrement favorable.

Mots-clés : suivi, indicateur, reproduction, migration, poissons, aloses, Charente, pressions

Populations of highly migratory fish have declined sharply since the 20th century. American shad and blueback herring were present in large numbers along the Atlantic coast and major rivers. The restriction of their range and their international protection status require the States concerned to take steps to ensure the conservation of their populations and habitats, with particular attention to the assessment of numbers and damaging environmental pressures. Annual monitoring of shad reproduction in the Charente watershed provides qualitative and quantitative indices of population dynamics on the Charente River. Non-invasive sampling of spawners on the Taillebourg spawning ground serves as a numerical indicator and is related to abiotic factors in the spawning environment. In 2023, a statistical estimate by PLSR shows that 3,143 blueback herring spawners came to spawn on the Taillebourg spawning ground, compared with 2,107 in 2022. Spawning activity follows a strong temporal variation and seems closely linked to water temperature and flow. The results suggest that the relatively wet and mild climatic conditions of the 2023 season provided shad with a particularly favorable migration and breeding environment.

Keywords: monitoring, indicator, reproduction, migration, fish, shad, Charente, pressure