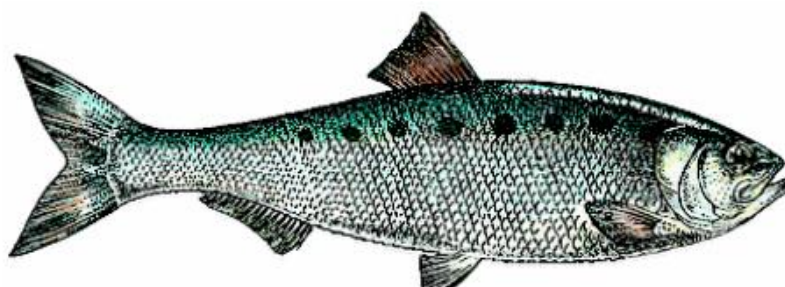


<p>Année universitaire : 2024 - 2025</p> <p>Spécialité : Génie de l'environnement</p> <p>Spécialisation (et option éventuelle) : Protection, Aménagement des Milieux et Ecologie Quantitative (PAMEQ)</p>	<p>Mémoire de fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)</p> <p><input type="checkbox"/> de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de l'Institut Agro Dijon (étudiant arrivé en M2)</p>
---	--

Suivi de populations d'aloses feintes sur la Charente : reproduction, indice d'abondance et impacts des facteurs environnementaux sur le comportement reproducteur

Par : Alicia GIRARD



©Dessin de Victor Nowakowski, extrait d'Inventaire de la faune de France, Nathan-MNHN, Paris, 1992.

Soutenu à L'institut Agro Rennes

Le 18 septembre 2025

Devant le jury composé de :

Présidente : Dominique Barloy

Maître de stage : Audrey Postic-Puivif

Enseignant référent : Manuel Plantegenest

Jury extérieur : Emilien Lasne

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation « Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France » disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : 21/08/2025
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ Nom Prénom GIRARD Alicia

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : 22/09/2025

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant : 23/09/2025

Manuel PLANTEGENEST

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement ma maître de stage, Audrey Postic-Puivif, pour son suivi et son aide tout au long du stage, ses connaissances très riches et ses conseils sur les milieux aquatiques et les poissons migrateurs qui les peuplent. La qualité de la formation et des échanges m'ont permis d'apprendre énormément et de développer de nouvelles compétences, sur le terrain comme au bureau.

Je souhaite ensuite remercier mon tuteur de stage, Manuel Plantegenest, qui a suivi avec attention l'avancement de ce stage. Les échanges tout au long de ces six mois ont beaucoup apporté à la construction et à la réflexion autour du sujet de ce mémoire, le rendant toujours plus riche grâce aux nombreuses questions pertinentes qu'il mettait en perspective.

Je voudrais également remercier les autres membres de l'équipe « poissons migrateurs » avec qui j'ai eu la chance de travailler : Yann Davitoglu, Léanne Jacob, Éric Buard, Ludivine Paragot, François Albert, Maxime Guinée et Pauline Van Cuyck. Merci beaucoup pour toutes les discussions enrichissantes, le partage et les sorties de terrain toujours dans la bonne humeur.

Enfin, je remercie toute l'équipe de l'EPTB pour leur accueil et leur intégration dans l'établissement et la bonne ambiance quotidienne. Je remercie aussi les deux autres stagiaires, Vivien et Matthias, pour le partage de la salle de réunion transformée en open-space pour stagiaires, l'entraide et la bonne humeur qui y régnaient.

Table des matières

Remerciements	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des annexes	
Avant-propos	
Introduction.....	1
1. Matériel et méthode	5
1.1. Zone d'étude et période de suivi.....	5
1.1.1. Le bassin versant de la Charente	5
1.1.2. La frayère de Taillebourg.....	6
1.2. Estimation du nombre de géniteurs sur la frayère de Taillebourg	6
1.2.1. Suivi audio : enregistrement des bulls	6
1.2.2. Suivi nocturne : nuits d'écoute sur le terrain	7
1.2.3. Dépouillement des enregistrements.....	7
1.2.4. Acquisition des variables environnementales.....	8
1.2.5. Analyses des données	9
1.2.6. Rythme d'écoutes des enregistrements du SMM	11
1.3. Précision et améliorations du modèle PLS	12
1.4. Impact du changement climatique sur l'activité de reproduction des aloses	12
1.3.1. Homogénéisation des données entre 2014 et 2025	12
1.3.2. Facteurs principaux influençant la reproduction	13
2. Résultats	13
2.1. Nombre de géniteurs d'aloses feintes en 2025.....	13
2.1.1. Résultats bruts.....	13
2.1.2. Résultats manquants.....	15
2.2. Choix du rythme d'écoute des données acoustiques	17
2.3. Précision du modèle PLS et pistes d'améliorations.....	19
2.4. Changement climatique et variations du comportement reproducteur	20
3. Discussion	23
3.1. Nombre de géniteurs et hypothèses de l'étude	23
3.2. Protocole de prédiction et rythme d'écoute des nuits	24
3.3. Changement climatique et comportement reproducteur	26
Conclusion et perspectives.....	27
Bibliographie.....	28
Annexes	31

Liste des abréviations

ALA = Grande alose
ALF = Alose feinte
AICc = Critère d'Informations d'Aikake corrigé
CAPENA = Centre pour l'Aquaculture, la Pêche et l'Environnement de Nouvelle-Aquitaine
CMCS = Cellule Migrateurs Charente – Seudre
COGEPOMI = Comité de Gestion des Poissons Migrateurs
CREAA = Centre Régional d'Expérimentation et d'Application Aquacole
EPTB = Etablissement Public Territorial de Bassin
GAM = Generalized Additive Model
GLM = Generalized Linear Model
IA = Intelligence Artificielle
LOGRAMI = Loire Grands Migrateurs
LOO = Leave One Out
MIGADO = Migrateurs Garonne Dordogne Charente Seudre
MRM = Migrateurs Rhône-Méditerranée
OMM = Organisation Mondiale Météorologique
PLAGEPOMI = Plan de Gestion des Poissons Migrateurs
PLS = Partial Least Square
POMI = Poissons Migrateurs
RMSEP = Root Mean Square Error of Prediction (erreur quadratique moyenne de prédiction)
SDAGE = Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SMM = Song Meter Micro
UICN = Union Internationale pour la Conservation de la Nature
VIP = Variable Importance in the Prediction

Liste des figures

FIGURE 1. CYCLES DE VIE DE LA GRANDE ALOSE ET DE L'ALOSE FEINTE (ANDRE ET AL., 2018).	2
FIGURE 2. PHOTOGRAPHIE D'UN BULL D'ALOSE (©ASSOCIATION MIGRATEURS RHONE-MEDITERRANEE).	3
FIGURE 3. CARTE DE LA FRAYERE DE TAILLEBOURG (©EPTB CHARENTE).	6
FIGURE 4. ENREGISTREUR OLYMPUS (A GAUCHE) CONTENU DANS LE BOITIER, AVEC PARABOLE ET ENREGISTREUR SMM (A DROITE) INSTALLE DANS UN ARBRE FACE A LA FRAYERE (PHOTOS ©AUDREY POSTIC-PUIVIF).	7
FIGURE 5. MATRICE DE CORRELATION DE PEARSON SUR LES VARIABLES EXPLICATIVES PAR RAPPORT AU NOMBRE DE BULLS ENTENDUS. LES CORRELATIONS POSITIVES SONT EN ROUGES ET LES NEGATIVES EN BLEUES. (ABREVIATIONS : VAR_TEMP = VARIABLE TEMPORELLE ; TAIRMOY = TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR ; TEAU = TEMPERATURE DE L'EAU ; DIFF_TEAU = VARIATIONS DE TEMPERATURES DE L'EAU SUR 24H, 48H ET 72H ; LUMXNEB = LUMINOSITE LUNAIRE ; DIFF_DEBIT = VARIATIONS DU DEBIT SUR 24H, 48H ET 72H ; COEFM = COEFFICIENT DE MAREE ; PLUVIO = PLUVIOMETRIE ; P_ATM_21H = PRESSION ATMOSPHERIQUE A 21H ; TEND_P_ATM = VARIATIONS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE SUR 24H).	9
FIGURE 6. GRAPHIQUE REPRESENTANT L'ERREUR QUADRATIQUE DE PREDICTION RMSEP. LA VALEUR LA PLUS FAIBLE CORRESPOND AU NOMBRE DE COMPOSANTES UTILISEES POUR LA REGRESSION PLS (DROITE POINTILLEE NOIRE).	10
FIGURE 7. GRAPHIQUE DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE BULLS ENTENDUS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU (EN °C) ET DU DEBIT (EN M ³ .S ⁻¹).	14
FIGURE 8. NOMBRE DE BULLS ENTENDUS CUMULES PAR QUARTS D'HEURE DEPOUILLES SUR LA PERIODE 11 AVRIL – 28 JUIN 2025. ...	14
FIGURE 9. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES PREDICTIONS DE BULLS PAR NUITS MANQUANTES (EN VERT) ET DES BULLS ENTENDUS SUR LES NUITS ECOUTEES (EN GRIS).	15
FIGURE 10. REPRESENTATION GRAPHIQUE DU NOMBRE DE BULLS CUMULES PAR QUARTS D'HEURE (ENTENDUS ET PREDITS).....	16
FIGURE 11. HISTOGRAMME DE L'EVOLUTION DU NOMBRE DE GENITEURS D'ALOSSES FEINTES SUR LA FRAYERE DE TAILLEBOURG AU COURS DU TEMPS.	17
FIGURE 12. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES INTERVALLES D'ACTIVITE DE REPRODUCTION PAR ANNEE SELON LA DATE (INTERVALLE = [MOYENNE – ECART-TYPE ; MOYENNE + ECART-TYPE]).....	21
FIGURE 13. GRAPHIQUE DE REGRESSION LINEAIRE DE L'EFFET DE LA TEMPERATURE DE L'EAU SUR LA DATE MOYENNE D'ACTIVITE DE	

REPRODUCTION DES ALOSES FEINTES.	22
FIGURE 14. GRAPHIQUE DU NOMBRE DE BULLS (ENTENDUS OU PREDITS) PAR NUIT EN 2025, EN FONCTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'EAU ET DES DIFFERENTES FENETRES DE TEMPERATURE FAVORABLES (15-18/18-22/22-26°C).	23

Liste des tableaux

TABLEAU 1. ESTIMATION DU NOMBRE DE BULLS SUR LES NUITS MANQUANTES (IC 95 = INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%).	15
TABLEAU 2. INDICE VIP DU MODELE PLS A 3 COMPOSANTES POUR LA PREDICTION DU NOMBRE DE BULLS DES NUITS MANQUANTES (ABREVIATIONS : VOIR FIGURE 5).....	15
TABLEAU 3. PREDICTION DES BULLS SUR LES QUARTS D'HEURE MANQUANTS ET CALCUL DU COEFFICIENT MULTIPLICATEUR.....	16
TABLEAU 4. CORRECTION DU NOMBRE DE BULLS FINAL PAR CALIBRATION.	16
TABLEAU 5. NOMBRE DE GENITEURS ESTIMES POUR L'ANNEE 2025.....	17
TABLEAU 6. ÉTAPES DE CALCULS DU NOMBRE DE BULLS ET DE GENITEURS D'ALLOSES SI UNE NUIT EST ECOUTEE SUR 4.....	17
TABLEAU 7. ÉTAPES DE CALCULS DU NOMBRE DE BULLS ET DE GENITEURS D'ALLOSES SI UNE NUIT EST ECOUTEE SUR 6.....	18
TABLEAU 8. COMPARAISON DES DIFFERENTS RYTHMES DE DEPOUILLEMENT DES ENREGISTREMENTS SELON DIFFERENTS CRITERES.	19
TABLEAU 9. PRECISION DES PREDICTIONS PLS ESTIMEES AVEC LE COEFFICIENT DE DETERMINATION R^2 ET CONFRONTATION AVEC LE NOMBRE DE NUITS ECOUTEES AINSI QUE LE NOMBRE DE VARIABLES EXPLICATIVES INTEGREES AU MODELE.	19
TABLEAU 10. ÉTAPES DE CALCULS DU NOMBRE DE BULLS ET DE GENITEURS D'ALLOSES POUR DES PREDICTIONS FAITES A PARTIR DE $\ln(\text{NB_BULL})$	20
TABLEAU 11. RESULTATS DES CALCULS DE DUREE EFFECTIVE (EN JOURS ; $Q95 - Q5$), DE MEDIANE, DE MOYENNE ET D'ECART-TYPE (EN JOURS) PAR ANNEE.	20
TABLEAU 12. NOMBRE DE JOURS PAR INTERVALLE DE TEMPERATURES PAR ANNEE ENTRE LE 20 MARS ET LE 9 JUILLET (ABREVIATION : TEAU = TEMPERATURE DE L'EAU).	22

Liste des annexes

ANNEXE 1. CAPTURE D'ECRAN DE L'INTERFACE DE L'APPLICATION SONG METER MICRO POUR CONFIGURER L'ENREGISTREUR EN BLUETOOTH.....	31
ANNEXE 2. EXEMPLES DE FORMES D'ONDES (AU-DESSUS) ET DE SPECTROGRAMMES (EN-DESSOUS) DE BULLS DETECTES (EN Hz) SUR AUDACITY©.	32
ANNEXE 3. REGRESSION LINEAIRE ENTRE LE NOMBRE DE BULLS ENTENDUS ET LE NOMBRE DE BULLS PREDITS AVEC LA METHODE UTILISANT LE LOGARITHME DU NOMBRE DE BULLS (R STUDIO).	32
ANNEXE 4. COMPARAISON DES PREDICTIONS PLS A 3 COMPOSANTES ENTRE LA METHODE UTILISANT LE NOMBRE DE BULLS ENTENDUS (AU-DESSUS) ET LA METHODE UTILISANT LE LOGARITHME DU NOMBRE DE BULLS ENTENDUS (EN-DESSOUS).	33
ANNEXE 5. TABLEUR DES DONNEES UTILISEES POUR LA REGRESSION LINEAIRE ENTRE LE JOUR MOYEN D'ACTIVITE ET LA TEMPERATURE MOYENNE ASSOCIEE A CHAQUE PERIODE (CF. 2.4.).	33
ANNEXE 6. ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'EAU QUOTIDIENNE ET PAR ANNEE. LE RECTANGLE VERT REPRESENTE LA FENETRE DE TEMPERATURE FAVORABLE POUR LA REPRODUCTION DES ALOSES (18-22°C) SELON APRAHAMIAN ET AL. (2003).	34
ANNEXE 7. HISTOGRAMME DU NOMBRE DE BULLS ESTIMES SUR LES SAISONS DE REPRODUCTION D'ALLOSES FEINTES DEPUIS 2010. (LA TENDANCE EST IDENTIQUE A CELLE DU NOMBRE DE GENITEURS, TOUT EN S'AFFRANCHISSANT DU BIAIS POSE PAR L'HYPOTHESE 1 FEMELLE = 10 BULLS.)	34

Avant-propos

L'Établissement Public Territorial du Bassin (EPTB) de la Charente a été créé en 1977 sous le nom de l'Institution du fleuve Charente (EPTB Charente, 2024). Cet établissement public territorial regroupe différents pôles d'études, dont un pôle « poissons migrateurs » qui fait partie de la Cellule Migrateurs Charente Seudre (CMCS) créée en 2008. La cellule est un partenariat qui regroupe l'EPTB Charente, le Centre pour l'Aquaculture, la Pêche et l'Environnement de Nouvelle-Aquitaine (CAPENA) qui a rejoint la cellule en 2009 et l'association Migrateurs Garonne Dordogne Charente Seudre (MIGADO) depuis 2018. L'objectif principal de cette cellule est d'acquérir des connaissances et des données sur les poissons migrateurs présents dans la Charente, car avant 2008, très peu de données sont disponibles sur le sujet. Leur mission principale est de suivre les différents poissons migrateurs de la Charente et de la Seudre, sur la base de programme d'actions pluriannuels. La CMCS se réfère aux objectifs posés par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et aux stratégies proposées par le Plan de Gestion des POissons Migrateurs (PLAGEPOMI). Plus précisément, ces démarches de suivi et de conservation des espèces amphihalines découlent du PLAGEPOMI du bassin Garonne – Dordogne – Charente – Seudre - Leyre. Ce plan de gestion est encadré par le Comité de Gestion des Poissons Migrateurs (COGEPOMI), une instance officielle. Il propose des stratégies et des mesures de gestion pour chacune des espèces migratrices, après en avoir fait l'état des lieux. Pour la grande alose, la stratégie proposée est de « restaurer l'espèce en comprenant les causes de raréfaction ». Pour l'alose feinte, moins vulnérable pour le moment, l'objectif est de surveiller l'espèce (COGEPOMI, 2021). Des bilans sont réalisés à chaque renouvellement du PLAGEPOMI.

Le programme pluriannuel actuel de la CMCS couvre la période 2021-2025. Il se compose de 5 orientations : le suivi des migrations, le suivi des espèces amphihalines, les tableaux de bord, les livrables ainsi que la gestion et l'animation du programme (EPTB Charente, [s d]). Grâce aux suivis mis en œuvre, un tableau de bord des poissons migrateurs a été créé en 2012 et est mis à jour chaque année afin d'évaluer l'état des populations de chaque espèce et de donner une tendance d'évolution de la population (en baisse, stable ou en hausse). Cette évaluation repose sur plusieurs indicateurs mesurés tout au long de l'année (effectif en migration, effectif de géniteurs, activité des frayères, linéaire accessible, aménagement des ouvrages, etc.) ; (EPTB Charente *et al.*, [s d]). Le présent mémoire va se concentrer sur l'indicateur « effectif de géniteurs » des aloses feintes, migrateurs potamotoques, sur le fleuve de la Charente.

Introduction

De nombreux poissons migrateurs parcourent les fleuves et rivières de France, pour s’y développer ou s’y reproduire. Ces espèces, dites amphihalines, ont un cycle de vie particulier, incluant des phases en milieu marin et en eau douce. Ces espèces sont très intéressantes car elles occupent un grand nombre d’habitats différents et exploitent également une grande diversité trophique de niches (Dubost *et al.*, 2024). Dans ses fleuves, la France accueille majoritairement les 12 espèces suivantes : la grande alose, l’alose feinte de l’Atlantique-Manche, l’alose feinte de Méditerranée, l’anguille européenne, les lamproies marines et fluviatiles, le saumon atlantique, la truite de mer, le flet commun, le mulot porc, l’éperlan et, plus anciennement, l’esturgeon européen (INRAE et OFB, 2022).

Le constat du déclin actuel de ces espèces et de la réduction de leurs aires de répartition fait qu’il est nécessaire de s’y intéresser afin de limiter la perte de cette biodiversité. Les facteurs de déclin de ces espèces sont principalement anthropiques avec : la destruction de leurs habitats, les ouvrages placés sur leurs voies de migrations, la dégradation de la qualité de l’eau, la prédation, la surpêche et plus récemment, le changement climatique. Les observations récentes de diminution des effectifs des populations de ces espèces posent question sur les mesures de conservation à mettre en place pour les préserver et sur la qualité des milieux qui les accueillent. La première sonnette d’alarme a retenti face à la disparition progressive de l’esturgeon, dont il ne reste que quelques centaines d’individus dans le bassin Gironde-Garonne-Dordogne (MIGADO, 2018). Ces espèces sont importantes pour le bon fonctionnement des écosystèmes, indicateurs de milieux aquatiques en bonne santé et d’une bonne continuité écologique. Ils fournissent des services de régulation en réalisant le seul flux de matière de la mer vers les rivières (BOREA, 2019). Ce sont aussi des espèces aux valeurs économiques et patrimoniales élevées en Europe (Elie et Baglinière, 2000). Cependant, la phase marine de leur cycle de vie reste peu documentée, ce qui complexifie leur conservation. Des programmes de recherche sont actuellement en cours (projet MigrenMer, programme DIADSea) ; (Dubost *et al.*, 2024), mais seule la phase fluviatile permet de les étudier et de les suivre pour le moment. Ces suivis permettent, par exemple, d’établir une estimation du nombre d’individus présents sur la période de reproduction (pour les espèces potamotoques) et une évaluation de la continuité écologique du milieu par la localisation du front de migration de chaque espèce. Cette étude va se concentrer sur les aloses, et plus particulièrement sur l’espèce de l’alose feinte de l’Atlantique-Manche.

Les aloses sont des poissons migrateurs, appartenant à l’ordre des Clupéiformes (Baumann, 2021). Initialement, elles faisaient partie de la famille des Clupéidés mais en 2023, elles ont été reclassées dans la famille des Alosidae (Maitland et Hatton-Ellis, 2003 ; Aquaportail, 2023). Le genre *Alosa* se compose de 23 espèces, principalement présentes sur la façade atlantique européenne et nord-américaine, la mer Méditerranée, la mer Noire, la mer d’Arzov et la mer Caspienne (Baumann, 2021). Les deux espèces les plus observées sur la façade atlantique européenne sont la grande alose (*Alosa alosa*, Linnaeus 1758) et l’alose feinte (*Alosa fallax*, Lacépède 1803). Au début du 20^{ème} siècle, les populations de grande alose étaient distribuées de la Norvège au Maroc, sur toutes les côtes Atlantiques et les îles Britanniques, mais aussi en Méditerranée occidentale (côtes marocaines). L’alose feinte était répartie plus au nord, allant jusqu’à l’Islande et se retrouvait sur l’ensemble du pourtour méditerranéen. Ces dernières décennies, leurs aires de répartition se sont fortement réduites en raison des activités anthropiques. La grande alose observe sa répartition nord-européenne disparaître. De même pour sa limite sud, qui remonte au nord du Maroc désormais. L’alose feinte a moins souffert de cette régression d’aire de distribution (Elie et Baglinière, 2000). Leur répartition est également impactée par deux facteurs importants influant sur la survie et sur le bon développement des aloses : (1) la température de l’eau, que le changement climatique impacte de plus en plus, entraînant une remontée des populations vers le nord, et (2) la granulométrie du substrat des rivières, qui possède un effet sur la survie et l’éclosion des œufs (Charles et Jatteau, 2010).

Depuis 2019, la grande alose est classée « en danger critique d'extinction » par l'UICN (Bellier *et al.*, 2024) et figure à l'Annexe III de la Convention de Berne et dans les Annexes II et IV de la Directive Habitats de l'Union Européenne (Baumann, 2021). De plus, un moratoire établi en France en 2008 interdit formellement la pêche de cette espèce sur le territoire du COGEPOMI, c'est-à-dire sur la Garonne, la Dordogne, la Charente, la Seudre et la Leyre (COGEPOMI, 2021). L'aloise feinte, quant à elle, a été déclassée en « quasi-menacée », mais présente une tendance à la baisse de ses effectifs (Abdallah, 2020).

Ce sont des espèces potamotoques, c'est-à-dire qu'elles se reproduisent en rivière et réalisent leur croissance en mer (Baumann, 2021 ; Bellier *et al.*, 2024). Les cycles des deux espèces d'aloses sont sensiblement similaires (Figure 1), notamment au niveau des seuils de températures qui interviennent pour la migration et la reproduction (André *et al.*, 2018).

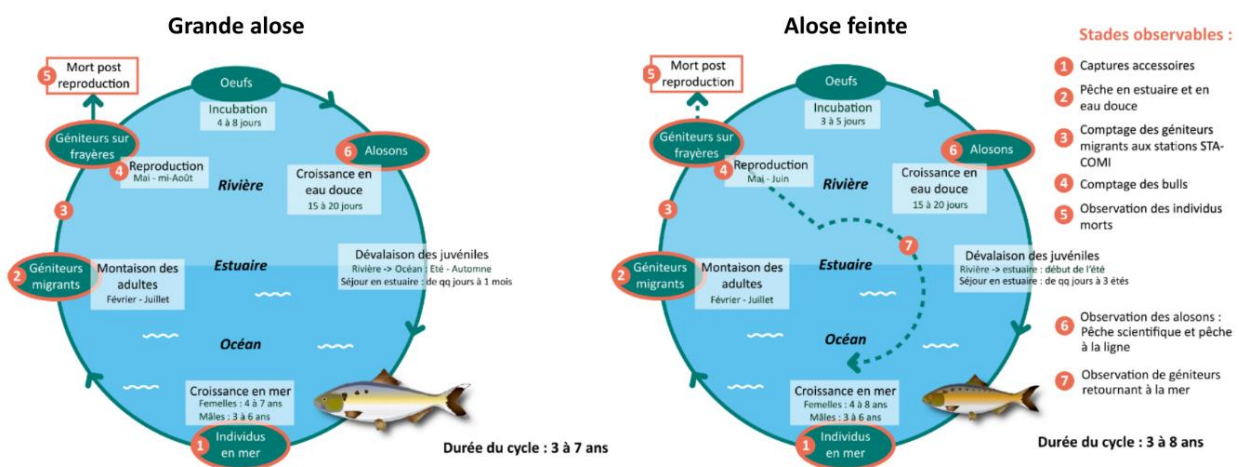


Figure 1. Cycles de vie de la grande alose et de l'aloise feinte (André *et al.*, 2018).

Environ 20 jours après l'éclosion des œufs, les larves se métamorphosent pour devenir des alosons (stade juvénile) ; (Charles et Jatteau, 2010). Les alosons procèdent alors à la dévalaison (migration vers la mer) et rejoignent les estuaires dans lesquels ils restent environ un mois, avant de se diriger vers la mer. Ils forment des bancs durant toute leur migration afin de diminuer la pression de prédation à laquelle ils sont soumis (Elie et Baglinière, 2000). Les juvéniles, ressemblant aux adultes, atteindront leur maturité après plusieurs années de vie en mer. Le temps de développement varie selon le sexe. Les mâles se développent pendant 3 à 6 ans et les femelles de 3 à 8 ans. La maturité sexuelle est atteinte en moyenne à un âge compris entre 4 et 6 ans pour les deux espèces (Baumann, 2021). Cette phase marine de leur vie reste méconnue, mais il est probable que les aloses se comportent de façon grégaire relativement proche des littoraux, sur le plateau continental (Taverny et Elie, 2001, dans Observatoire des poissons migrateurs de Bretagne, [s d]). Comparée à la grande alose, l'aloise feinte va vivre sur des zones plus proches de la côte, avec une préférence pour des eaux peu profondes, entre 10 et 20 mètres environ (André *et al.*, 2018 ; Maitland et Hatton-Ellis, 2003). Une fois matures, les futurs géniteurs migrent à nouveau vers les rivières pour se reproduire (Baumann, 2021 ; Charles et Jatteau, 2010 ; Maitland et Hatton-Ellis, 2003). Cette migration, appelée la montaison, se réalise de février à juin pour la grande alose et de février à mai pour l'aloise feinte (Charles et Jatteau, 2010). La montaison est initiée lorsque la température de l'eau atteint les 10-12°C (Aprahamian *et al.*, 2003 ; Baumann, 2021). La grande alose migre beaucoup plus loin vers l'amont des cours d'eau (jusqu'à 800 km) que l'aloise feinte (Elie et Baglinière, 2000) et démontre un comportement de « homing » (retour sur le lieu de naissance) ; (COGEPOMI, 2021). L'aloise feinte reste proche des estuaires en migrant

généralement jusqu'à 50 km vers l'amont du fleuve. Cette distance peut varier selon les fleuves, par exemple, sur la Charente, des aloses feintes sont retrouvées jusqu'à 120 km au-delà de l'estuaire. Les aloses cessent de se nourrir pendant toute la durée de leur migration (Rougier *et al.*, 2012).

Pendant la période de reproduction qui se déroule d'avril à juillet pour la grande alose, et d'avril à juin pour l'aloise feinte, les géniteurs se reproduisent sur des frayères essentiellement la nuit. Pour la viabilité des œufs, les frayères favorables répondent à des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques particulières. L'habitat de frai de l'aloise feinte dans les rivières consiste en une zone peu profonde d'écoulement rapide sur un substrat de gravier-cailloux ou de galets non consolidés. Les frayères se situent généralement dans des zones de « plat-courant », avec une vitesse comprise entre 1 et 2 m.s⁻¹ (André *et al.*, 2018), et d'une profondeur de 3 mètres maximum (Elie et Baglinière, 2000). Elles se composent de deux zones distinctes : la « mouille », qui est la zone de frai à proprement parler et le « radier », à son aval, qui constitue la zone d'incubation des œufs (Belaud *et al.*, 2001).

Les actes de reproduction entre deux géniteurs sont identifiables au son caractéristique qu'ils produisent : le « bull » (Figure 2). Il résulte du claquement des queues de poissons sur l'eau lorsqu'ils nagent rapidement en mouvement circulaire, le temps que la femelle libère ses œufs et que le mâle les féconde. Les œufs fécondés sont entraînés vers le fond grâce au courant généré pendant le bull (André *et al.*, 2018). L'acte de reproduction, qu'on appellera tout au long de ce mémoire le bull, est assez court, entre 2 et 10 secondes selon l'espèce et la libération des gamètes dure entre 4 à 7 secondes (Belaud *et al.*, 2001). La grande alose est une espèce sémelipare, c'est-à-dire qu'elle réalise une seule saison de reproduction et mourra une fois le stock d'œufs pondus. Au contraire, l'aloise feinte est considérée comme itéropare, pouvant réaliser l'aller-retour migratoire entre la mer et la rivière jusqu'à 5 fois (Abdallah, 2020 ; André *et al.*, 2018).



Figure 2. Photographie d'un bull d'aloise (©Association Migrateurs Rhône-Méditerranée).

La température joue un rôle important dans le déclenchement de la reproduction, avec une valeur seuil se situant au-dessus de 15°C généralement (Maitland et Hatton-Ellis, 2003). La fenêtre la plus favorable à l'incubation des œufs (et par conséquent à la ponte) se situe entre 18 et 22°C (Aprahamian *et al.*, 2003), car les œufs sont sensibles à des températures inférieures à 16-18°C (Maitland et Hatton-Ellis, 2003). Suite à leur étude de 2017, Jatteau *et al.* démontrent que la tolérance thermique acceptée par les œufs et les jeunes stades d'aloses se situe entre 16.2 et 24.8°C (Paumier, 2021). Les géniteurs d'aloses adapteraient donc leur comportement lors de la reproduction pour augmenter la survie de leur progéniture, et se reproduiraient dans des gammes de températures situées entre 14.5°C et 23°C,

une fenêtre plus large que celle proposée par Maitland et Hatton-Ellis en 2003. Dans sa thèse de 2021, Paumier décrit des modèles corrélatifs testés pour analyser la sensibilité des aloses aux variations des conditions environnementales dans un contexte de changement climatique. Dans ce modèle, la probabilité de fraie est corrélée de façon positive à la durée du jour (conditions optimales : différence de la longueur du jour entre 0 et 0.04 heure) et à la température de l'eau (conditions optimales : 15°C à 26°C). Au contraire, le débit présente une corrélation négative avec des conditions optimales qui se situeraient entre 55 m³.s⁻¹ et 665 m³.s⁻¹ dans le cas de la Garonne et de la Dordogne, mais qui ne sont pas applicables aux autres fleuves français (Paumier, 2021).

Ces espèces représentent un intérêt majeur dans leur environnement, car elles sont très sensibles et témoignent d'un écosystème en bonne santé, avec une bonne continuité écologique du milieu (trame bleue). En effet, contrairement au saumon atlantique, les aloses ne sautent pas les obstacles et se retrouvent vite bloquées par les ouvrages qui se dressent sur leur chemin. À titre d'exemple, le bassin versant de la Charente et de la Seudre en dénombre environ 2500 (EPTB Charente, 2024). Des dispositifs de franchissement fonctionnels tels que les passes à poissons (à enrochements régulièrement répartis, à ralentisseurs ou à bassins successifs), les rivières de contournement, les radiers successifs et les pré barrages sont aménagés, mais encore trop peu d'ouvrages sont traités sur le bassin. Les ascenseurs et les écluses sont des dispositifs qui existent sur d'autres fleuves. Tout cela cause la rupture de la continuité écologique et a pour conséquence de réduire la distribution spatiale des aloses le long du cours d'eau. Les aloses n'accèdent plus à leur frayère et sont contraintes de se reproduire sur des frayères de plus en plus proches de l'estuaire ou n'ayant pas les caractéristiques optimales pour accueillir leur progéniture. Les aloses répondent à ces perturbations en modifiant leur répartition géographique et leur rythme migratoire (Abdallah, 2020), ce qui entraîne des phénomènes d'hybridation entre les deux espèces (grande alose et alose feinte), qui finissent par se reproduire aux mêmes endroits (Elie et Baglinière, 2000).

En plus de la réduction de leurs aires de distribution sur le fleuve, les aloses subissent les nombreuses pressions majoritairement anthropiques citées précédemment, qui se cumulent et causent leur déclin (Elie et Baglinière, 2000 ; Adam *et al.*, 2015). La mauvaise qualité et la pollution de l'eau causent des dommages sur la physiologie et la santé des aloses (Bellier *et al.*, 2024 ; Bancel *et al.*, 2025). Les aloses sont aussi impactées par la pêche, soit par les pêcheurs en eau douce, soit dans des prises accessoires en mer (« bycatch » en anglais), dommages collatéraux de la surpêche (Maitland et Hatton-Ellis, 2003 ; Abdallah *et al.*, 2021). La dégradation et la destruction physique d'habitats et plus particulièrement des frayères constituent une autre cause de déclin. En parallèle, la prédation par le Silure glane de plus en plus fréquente réduit les populations pendant la reproduction. Il a été observé que les silures se rassemblent au pied des ouvrages, profitant du fait que les aloses soient bloquées dans leur migration pour les attaquer (COGEPOMI, 2021). Et enfin, le changement climatique influe de plus en plus sur les paramètres environnementaux tels que la température de l'eau, comme évoqué précédemment, mais aussi sur la sensibilité aux maladies.

Cette étude va donc avoir deux grands axes. Le premier consiste à estimer le stock de géniteurs d'aloses feintes présents cette année sur la Charente, pendant la période de reproduction, afin de le comparer aux années précédentes. Elle répond au déclin du nombre de géniteurs recensés par l'EPTB sur la Charente. Cette estimation concernera seulement les aloses feintes sur la frayère de Taillebourg, par manque de moyens humains pour assurer les comptages sur toutes les frayères. Il est considéré qu'il n'y a pas de grandes aloses présentes sur cette frayère, qui est la plus proche de l'estuaire. Des améliorations seront testées et apportées à la méthode utilisée. Le deuxième point d'étude consiste à explorer l'impact des conditions environnementales sur la reproduction des aloses. Dans un contexte de changement climatique, avec entre autres l'augmentation des températures, plusieurs questions se posent quant aux conséquences sur le comportement reproducteur des aloses. Une étude menée sur différents fleuves français a mis en évidence des dates d'initiation de la migration de plus en plus précoces, avec une moyenne de 3,7 jours de différence par décennie (Legrand *et al.*, 2020). Cette

variation de temporalité induite sur la migration laisse présager une variation similaire sur la période de reproduction. La température de l'eau et le débit sont des paramètres environnementaux prépondérants dans l'initiation de la migration chez les aloses. Plus encore, une fois initiée, la migration mène à l'ouverture de la saison de reproduction, qui sera tout du long sous l'influence de la température de l'eau. Cela signifierait que les variations de température ont un impact sur la réalisation des bulls par les aloses (Observatoire des poissons migrateurs de Bretagne, [s d]). Tout cela pose plusieurs questions auxquelles la présente étude va s'essayer de répondre : Comment varie le nombre de bulls au cours du temps ? Comment varie la date du pic de bulls au cours du temps ? Comment les conditions favorables de reproduction pour l'alose ont évolué au cours du temps ? Comment cela impacte-t-il le comportement de reproduction de l'alose ? Y a-t-il un phénomène d'adaptation significatif ?

Dans un premier temps, nous détaillerons le matériel et les méthodes utilisées. Le contexte du bassin versant de la Charente ainsi que la zone d'étude précise seront explicités. Le matériel utilisé tout au long de l'étude sera détaillé et les méthodes pour parvenir aux résultats seront expliquées, avec notamment : la méthode de comptage de bulls et la méthode d'estimation du nombre de géniteurs d'alesos feintes sur le site de Taillebourg, à partir du nombre de bulls entendus. Dans une seconde partie, les résultats obtenus seront exposés, suivis d'une partie de discussion pour les interpréter et évoquer les limites de l'étude.

1. Matériel et méthode

1.1. Zone d'étude et période de suivi

1.1.1. Le bassin versant de la Charente

Le bassin versant de la Charente couvre une superficie de 10 100 km² répartis sur la région Nouvelle-Aquitaine et sur six départements (Charente, Charente-Maritime, Deux-Sèvres, Dordogne, Haute-Vienne et Vienne). Il contient 6 500 km de cours d'eau ainsi que 40 000 ha de marais (EPTB Charente, [s d]). Le bassin charentais est soumis à l'influence océanique, régulant la température et la pluviométrie. Les précipitations moyennes s'élèvent entre 800 et 900 mm d'eau/an (Adam *et al.*, 2015). C'est un bassin qui englobe des écosystèmes importants pour la croissance, le développement et la reproduction des espèces migratrices.

Son fleuve principal, la Charente, est un fleuve d'une longueur totale de 360 km. Il prend sa source à 310 m d'altitude, à Chéronnac. À Saintes, il a un débit moyen de 140 m³/s (Migrateurs Charente Seudre, [s d]). Sa pente générale est faible (<1 %) voire très faible sur les cent derniers kilomètres avant l'estuaire (<0.04 %) (Adam *et al.*, 2015 ; EPTB Charente, [s d]). L'estuaire de la Charente, d'une longueur de 50km, est le dernier point de passage avant de rejoindre l'océan. Les effets de la marée sont visibles jusqu'en amont de Saintes, qui se situe à 80 km de l'océan (Migrateurs Charente Seudre, [s d]).

Au niveau des espèces migratrices, la Charente en accueille 9 des 12 espèces recensées en France, à savoir l'anguille, les lamproies marines et fluviatiles, le saumon atlantique, la truite de mer, le mulot, le flet et deux espèces d'alesos : la grande alose et l'alose feinte. Une cinquantaine de frayères d'alesos ont été recensées par la CMCS sur tout le linéaire du fleuve. Des prospections de nuit pour observer l'activité de ces frayères sont réalisées par les équipes tout au long de la période de reproduction. Cette année, 28 frayères ont été prospectées sur le linéaire de la Charente, de Saint-Savinien à Basseau, et une située sur la Boutonne, un affluent de la Charente.

1.1.2. La frayère de Taillebourg

L'étude est réalisée sur la frayère de Taillebourg, une frayère fréquentée par les aloses feintes uniquement. La frayère de Taillebourg est considérée comme la première frayère d'aloses de la Charente. Située à 50 km de l'estuaire (Figure 3) elle est soumise à la marée. Elle se situe en amont du premier barrage de la Charente : le barrage de Saint-Savinien. Cet obstacle, bloquant la migration des aloses, est désormais équipé d'une passe à anguilles et d'une passe à poissons fonctionnelles sur le bras rive droite depuis 2019. La continuité écologique est donc rétablie à cet endroit du fleuve. Il subsiste un retard possible des poissons migrateurs quand ceux-ci s'engagent sur le bras rive gauche menant à un barrage mobile composé de trois vannes et d'une écluse. Le site étant soumis à la marée, les franchissements sont possibles à certains moments. Le département de la Charente-Maritime a engagé une étude d'optimisation de gestion du site pour augmenter les périodes de franchissement.

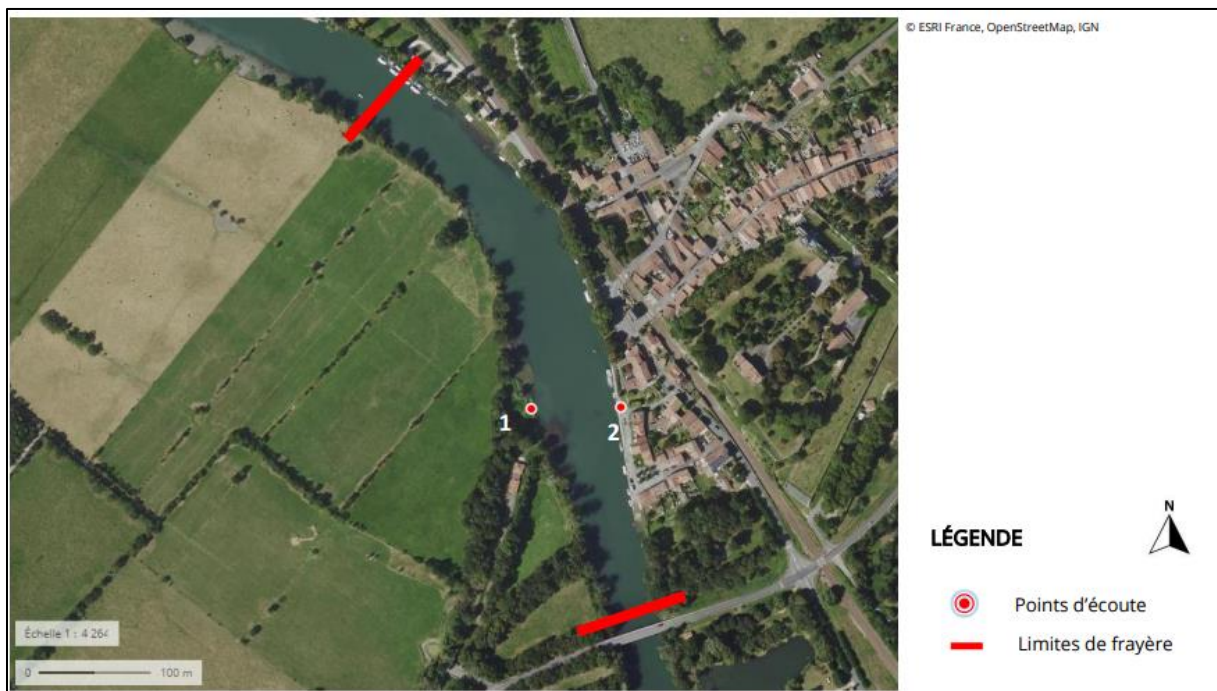


Figure 3. Carte de la frayère de Taillebourg (©EPTB Charente).

La période de suivi correspond à la période de reproduction des aloses feintes entre les mois d'avril et de juin. Cette année le suivi par enregistrements a commencé le 11 avril et s'est terminé le 28 juin 2025, soit un total de 78 nuits.

1.2. Estimation du nombre de géniteurs sur la frayère de Taillebourg

Le protocole de dépouillement des enregistrements et la méthode d'estimation ont été fixés en 2014 par T. Brias (Brias, 2014) et améliorés par M. Labedan en 2017 (Labedan, 2017). Ce protocole est utilisé par la CMCS depuis, ce qui permet d'avoir des résultats comparables d'année en année.

1.2.1. Suivi audio : enregistrement des bulls

Dans un premier temps, il est nécessaire de détecter le début de la saison de reproduction en repérant l'apparition de bulls sur la frayère. Un enregistreur OLYMPUS est donc posé pendant une nuit et dépouillé le lendemain dans cet objectif, lorsque les conditions environnementales sont favorables à l'initiation de la reproduction des aloses (cf. Introduction + à dire d'experts). Cette année, l'enregistreur a été posé durant trois nuits : du 31/03 au 01/04, du 07/04 au 08/04 et du 09/04 au

10/04. La détection de bulls pendant l'écoute de ces enregistrements donne le feu vert pour poser le Song Meter Micro 2^{ème} génération (SMM 2), qui a été posé le 11/04. Ce deuxième type d'enregistreur est utilisé sur toute la saison, permettant d'enregistrer toutes les nuits sans coupure, grâce à un programme qui déclenche la prise de données de 23h00 à 6h00 (Annexe 1). L'avantage du SMM est qu'il est autonome et qu'il est possible de le suivre à distance (état des piles et du remplissage de la carte SD via une application sur smartphone). De plus, un seul relevé par semaine sur le terrain est nécessaire afin de récupérer les données acquises et de changer la carte SD (alternance de deux cartes pour éviter une saturation et une perte de données en conséquence), contrairement à l'OLYMPUS, pour lequel un relevé quotidien est requis.



Figure 4. Enregistreur OLYMPUS (à gauche) contenu dans le boîtier, avec parabole et enregistreur SMM (à droite) installé dans un arbre face à la frayère (photos ©Audrey Postic-Puivif).

La fréquence émise par un bull est d'environ 5000-6000 Hz, mais selon la distance à laquelle se situe par rapport à l'enregistreur, la fréquence peut varier. Pour entendre correctement les bulls, il faut sélectionner une fréquence d'échantillonnage adaptée. Le spectre de l'audible, qui atteint son maximum à 20 000 Hz, est utilisé comme référence. Selon le théorème de Nyquist, il faut échantillonner les sons par le double de leur plage de fréquence. Dans notre cas, et pour rester dans le spectre audible, il faut échantillonner au minimum à partir de 40 kHz. La fréquence d'échantillonnage sélectionnée cette année sur le SMM est de 48 000 Hz. Cela signifie que l'enregistreur prend 48 000 mesures par seconde, ce qui permet d'avoir un son avec la meilleure résolution possible. De plus, cette fréquence consomme moins d'énergie et les enregistrements sont moins lourds à stocker, en comparaison avec la fréquence de 44 100 Hz qui aurait pu être sélectionnée (commentaire personnel : réunion avec l'association Loire Grands Migrateurs [LOGRAMI]).

1.2.2. Suivi nocturne : nuits d'écoute sur le terrain

En parallèle des enregistrements, une calibration d'une heure d'écoute active à l'oreille sur la frayère de Taillebourg a été réalisée durant quatre nuits par binôme. L'objectif est de calibrer l'enregistreur par rapport à l'écoute de terrain et ainsi de diminuer les sources de biais qui peuvent être liées à la portée de l'enregistreur et aux bruits parasites, tels que les chauves-souris ou les voitures captés par l'enregistreur et pouvant se superposer aux sons des bulls.

1.2.3. Dépouillement des enregistrements

Contrairement aux années passées, le SMM utilisé cette année enregistre toutes les nuits de la saison. De ce fait, un rythme de dépouillement des bandes sonores doit être choisi, qui devra permettre une prédiction fiable des données manquantes, tout en réduisant au maximum le temps passé par l'agent chargé des écoutes. Il a donc été décidé de dépouiller une nuit sur deux pour cette année. Cela

permettra d'évaluer différents rythmes d'écoute en testant les prédictions pour les cas suivants : 1 nuit écoutée sur 2, sur 4 et sur 6. Il aurait été intéressant d'avoir aussi les prédictions pour 1 nuit sur 3, mais cela revenait à dépouiller toutes les nuits de la saison, ce qui n'était pas possible dans le cadre du stage pour des raisons de temps.

Le traitement des données acoustiques est réalisé avec le logiciel Audacity®. Les enregistrements sont écoutés sur la plage horaire 23h00 – 06h00, découpée en quarts d'heures. Seul un quart d'heure sur deux est écouté, en commençant par celui de 23h00/23h15, ce qui fait un total de 14 quarts d'heures dépouillés par nuit. Ce choix d'écoute incomplet est possible car la répartition du nombre de bulls sur une nuit suit une loi de Poisson. Ainsi, les bulls des quarts d'heure manquants peuvent être aisément prédits (Brias, 2014). Durant ces quarts d'heure, tous les bulls identifiés sont comptabilisés et commentés. En effet, les bulls prédatés peuvent être différenciés des bulls classiques, avec le bruit caractéristique de chasse des silures sur l'eau, plus intense, perturbant le bull initié par les aloses. Seuls les bulls ayant une durée supérieure à deux secondes sont conservés (limite les artefacts, qui peuvent correspondre à des poissons en chasse, par exemple). S'il pleut ou s'il y a trop de vent, les bulls ne peuvent pas être identifiés. Les données sont recensées dans un tableur Excel pour les analyses.

La forme d'onde ainsi que le spectrogramme de l'enregistrement (Annexe 2) sont utilisés pour faciliter l'identification des bulls (protocole LOGRAMI). La forme particulière de l'onde et le spectrogramme caractéristique du bull sont reconnaissables visuellement. Cependant, des bruits parasites, plus particulièrement les véhicules motorisés, peuvent couvrir les indices visuels des bulls, car ils se situent sur des fréquences similaires. En plus de tout cela, cette frayère accueille des aloses feintes dont la durée des bulls est en moyenne de 3,5 secondes, ce qui facilite encore plus leur « camouflage » par des bruits extérieurs plus longs (Annexe 2).

1.2.4. Acquisition des variables environnementales

La reproduction des aloses est dépendante de nombreux facteurs environnementaux qui seront inclus dans cette analyse afin d'obtenir des résultats robustes et vraisemblables.

La température de l'eau est mesurée de façon continue par une sonde HOBO®, à raison d'une mesure par heure, à Taillebourg. Ces températures (en °C) ont été moyennées pour chaque jour et les variations de températures sur 24h, 48h et 72h ont été calculées.

Le débit et le coefficient de marée sont fournis par le département de la Charente-Maritime. Le débit est calculé en additionnant les débits (en m³/s) des stations de Beillant (Charente) et de la Lijardière (Seugne). Les variations de débits sur 24h, 48h et 72h ont été calculées.

La température moyenne de l'air et la pluviométrie proviennent des données météorologiques de la station du Château d'Oléron, fournies par l'Organisation Mondiale Météorologique (OMM).

La nébulosité totale à 21h (en %), la pression atmosphérique (en Pa) et la variation de pression en 24h (en Pa) proviennent des données SYNOP (code synoptique des données d'observations issues des messages internationaux d'observation en surface) essentielles de l'OMM relevées par la station de la Pointe de Chassiron, sur l'île d'Oléron.

Le pourcentage de visibilité de la Lune provient du Calendrier lunaire 2025. Ainsi, la luminosité lunaire (en %) a été calculée ($= \text{visibilité de la lune} \times \text{nébulosité totale} / 100$).

Enfin, une variable discrète de temporalité est utilisée pour suivre les jours de la saison de reproduction. Le numéro 1 correspondant à la première nuit dépouillée (11 avril 2025) et allant

jusqu'au numéro 78 (27 juin 2025).

1.2.5. Analyses des données

Toutes les analyses sont réalisées avec les logiciels R (version 4.3.3) et Excel. L'ordre des étapes présenté ci-dessous suit le protocole de T. Brias, avec les améliorations de M. Labedan. Des tests ont été réalisés cette année, en modifiant l'ordre des étapes, mais aucun changement n'a été mis en place car cela n'avait soit aucun impact significatif, soit menait à des résultats incohérents. De plus, pour une homogénéité des résultats entre les différentes années, l'ordre établi en 2014 est conservé.

Variables environnementales

La normalité des variables a été testée avec un test de Shapiro et une non-normalité est constatée pour plusieurs variables. Un test de corrélation de Spearman est alors réalisé pour déterminer la colinéarité des variables explicatives entre elles (seuil de 0,7). La matrice ci-dessous (Figure 5) permet de constater une multicollinéarité entre les variables explicatives, qui constitue la raison principale de l'utilisation de la régression *Partial Least Square* (PLS).

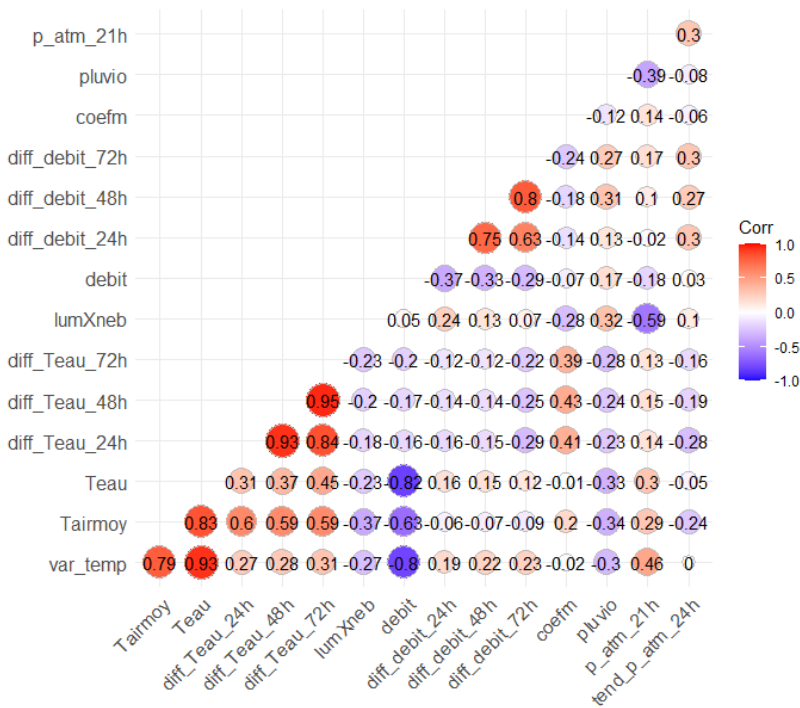


Figure 5. Matrice de corrélation de Pearson sur les variables explicatives par rapport au nombre de bulls entendus. Les corrélations positives sont en rouge et les négatives en bleu. (Abréviations : var_temp = variable temporelle ; Tairmoy = température moyenne de l'air ; Teau = température de l'eau ; diff_Teau = variations de températures de l'eau sur 24h, 48h et 72h ; lumXneb = luminosité lunaire ; diff_debit = variations du débit sur 24h, 48h et 72h ; coefm = coefficient de marée ; pluvio = pluviométrie ; p_atm_21h = pression atmosphérique à 21h ; tend_p_atm = variations de pression atmosphérique sur 24h).

La régression linéaire, qu'elle soit simple ou multiple, nécessite des relations linéaires entre la variable à expliquer et ses variables explicatives. Cependant, deux des variables environnementales considérées dans l'étude ne réagissent pas de façon linéaire avec l'activité de reproduction (soit le nombre de bulls) et leur R^2 est très faible. Ce sont la température de l'eau et la variable temporelle qui semblent être liées au nombre de bulls par une relation polynomiale du second degré. Dans ce cas-là, ces deux variables vont être ajustées par une méthode quadratique afin d'être intégrées à la PLS (Wold *et al.*, 1989 dans Bekkai, 2023).

Extrapolation des nuits manquantes

Cette année, 39 nuits ont été écoutées et dépouillées. Le nombre de bulls des nuits non-dépouillées sur la période de reproduction va être extrapolé à partir des données de ces 39 nuits. Pour cela, la méthode PLS va être utilisée à l'aide de la fonction *plsrf()* sur R. Cette méthode de régression linéaire complexe permet de conserver toutes les variables explicatives et de s'affranchir de leur multicollinéarité en les rassemblant sous forme de composantes. Le nombre de composantes est

déterminé par le test Leave-One-Out (LOO) qui donne l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP). La plus faible valeur RMSEP correspondant à un nombre de composantes est conservée et cette année, 3 composantes sont retenues (Figure 6).

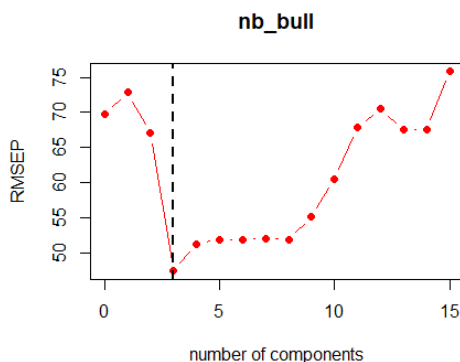


Figure 6. Graphique représentant l'erreur quadratique moyenne de prédiction RMSEP. La valeur la plus faible correspond au nombre de composantes utilisées pour la régression PLS (droite pointillée noire).

À partir de ces composantes, le nombre de bulls des nuits manquantes sera obtenu avec la fonction *predict()*. L'indice de confiance à 95 % est ensuite calculé à l'aide d'une régression linéaire entre le nombre de bulls entendus et le nombre de bulls prédits sur les mêmes nuits. La marge d'erreur relative est calculée avec :

$$(1) \text{ Marge d'erreur relative} = \frac{\text{moyenne borne supérieure} - \text{moyenne théorique}}{\text{moyenne théorique}}$$

Prédiction des quarts d'heure manquants

Les résultats obtenus à l'étape précédente ne concernent qu'un quart d'heure sur deux de chaque nuit entre 23h00 et 6h00. Il est donc nécessaire de prédire l'activité de reproduction des aloses sur les quarts d'heure manquants afin d'avoir la totalité de l'activité sur chaque nuit. Les quarts d'heure écoutés sont extrapolés à ces quarts d'heure manquants. Les données utilisées sont le nombre de bulls cumulés par quart d'heure écouté sur toute la saison. Les prédictions sont réalisées à partir de modèles linéaires généralisés (GLM), et donc de la fonction *glm()* sur R avec une fonction de lien de type *Poisson* car la distribution du nombre de bulls par quart d'heure suit une loi de Poisson. Le modèle suit alors une courbe polynomiale et plusieurs tests GLM sont réalisés pour en définir le degré. Le meilleur modèle est représenté par le plus faible Critère d'Informations d'Aikake corrigé (AICc). La fonction *predict()* est à nouveau utilisée pour prédire le nombre de bulls des quarts d'heure manquants. La somme du nombre de bulls des quarts d'heure prédits permet ensuite de calculer un coefficient multiplicateur, nécessaire pour les intégrer aux extrapolations précédentes :

$$(2) \text{ Coefficient multiplicateur} = \frac{\text{bulls cumulés entendus} + \text{bulls cumulés prédits}}{\text{bulls cumulés entendus}}$$

Ce coefficient sera multiplié au nombre de bulls total (bulls entendus + bulls prédits sur les nuits manquantes), qui prenaient en compte uniquement les quarts d'heure dépouillés (14 quarts d'heure sur 28). L'indice de confiance à 95 % est calculé ainsi que la marge d'erreur relative.

Calibration

La calibration est réalisée entre le nombre de bulls entendus à l'oreille sur le terrain et le nombre de bulls entendus avec l'enregistreur. Cela va permettre d'ajuster le nombre de bulls final au plus proche de ce qui se passe réellement sur la frayère. La comparaison, réalisée avec les données de quatre nuits différentes, pour une durée de 1 heure (4 quarts d'heure consécutifs) sur le terrain et sur les enregistrements. Une régression linéaire entre les bulls entendus sur enregistreur et entendus sur le

terrain va permettre d'ajuster le nombre de bulls obtenus précédemment, à l'aide de l'équation de régression de type $y = ax + b$ (avec x le nombre de bulls total calculé précédemment). L'indice de confiance à 95 % est calculé ainsi que la marge d'erreur relative.

Calcul du nombre de géniteurs

L'estimation de l'effectif de géniteurs d'aloses feintes repose sur plusieurs hypothèses, posées tout d'abord par Cassou-Leins *et al.* (1981), Dartiguelongue (1996) et citées par Elie et Baglinière (2000) dans le livre « Les aloses (*Alosa alosa* et *Alosa fallax* spp.) » :

- 1) Les géniteurs se reproduisent sur une unique frayère.
- 2) Un bull correspond à une seule femelle.
- 3) Une femelle ne réalise qu'une ponte par nuit.
- 4) Le sex ratio est de 1 : 1 sur le site de fraie.
- 5) Une femelle réalise 5 à 7 pontes au cours de la saison de reproduction. En effet, chaque femelle va effectuer l'acte de reproduction, le bull, plusieurs fois sur la saison, jusqu'à ce qu'elle n'ait plus d'œufs à pondre.

Cette dernière hypothèse a fait l'objet de débat et en 1996, Dartiguelongue estime le nombre de pontes par femelle à 10 pontes. Ce chiffre est confirmé par l'étude de Chanseau *et al.* (2005) avec MIGADO. Nous retenons donc comme dernière hypothèse :

5) Au cours d'une saison de reproduction, une femelle réalise en moyenne 10 pontes. Des deux hypothèses, cette valeur minimise le nombre de poissons à la fin, évitant une surestimation de la population.

Ces hypothèses sont initialement posées dans le cas de la grande alose, espèce plus étudiée que l'alose feinte. Par manque de données sur cette dernière, ces hypothèses lui seront donc attribuées, sachant que les deux espèces sont très proches génétiquement et présentent un cycle de vie quasi identique.

Pour finir, l'estimation du nombre de géniteurs d'aloses feintes sur la frayère de Taillebourg est calculée avec la formule suivante :

$$(3) \text{ Nombre de géniteurs estimé} = \frac{\text{Nombre de bulls estimé sur une année}}{\text{Nombre de ponte par femelle (=10)}} \times 2$$

Une fois ce résultat obtenu et pour aller plus loin dans l'analyse, l'approche de l'étude sera plus exploratoire. Que ce soit pour tester la précision de la méthode PLS et tenter de l'améliorer ou pour tester l'impact de certaines variables explicatives sur le nombre de bulls, la base de données établie depuis plus de dix ans va être mobilisée pour exploiter le maximum de données disponibles.

1.2.6. Rythme d'écoutes des enregistrements du SMM

Le SMM mis en place pour l'enregistrement complet de la saison de reproduction de 2025 a permis d'automatiser l'acquisition des données et d'avoir les enregistrements de toutes les nuits. Cependant, il n'est pas possible de toutes les écouter une par une pour déterminer le nombre de bulls sur la saison, car cela prendrait trop de temps. C'est pour cette raison que la méthode PLS a été mise en place. Désormais, il est nécessaire de décider pour quel rythme d'écoute opter, faisant le compromis entre gain de temps et force de la prédiction PLS. C'est dans cet objectif qu'une nuit sur deux a été dépouillée cette année. À partir de cela, il est possible de calculer les prédictions pour une nuit sur 4 ainsi que pour une nuit sur 6 et de les comparer pour choisir le meilleur rythme d'écoute. La méthode de prédiction est identique à celle utilisée pour le rythme d'une nuit sur deux.

1.3. Précision et améliorations du modèle PLS

Précision du modèle PLS

Avant de commencer tout calcul utilisant les prédictions de la méthode PLS, il est nécessaire de vérifier la qualité de la prédiction afin que la méthode ne constitue pas un biais en elle-même. Pour cela, les coefficients de détermination (R^2) entre le nombre de bulls entendus par rapport au nombre de bulls prédits vont être calculés pour chaque année. Si la valeur de R^2 est proche de 1, cela signifie que la prédiction est fiable et forte, alors qu'au contraire si la valeur tend vers zéro, la prédiction est considérée comme mauvaise. Les valeurs seuil du R^2 sont difficiles à fournir car cela dépend essentiellement de l'étude réalisée. Pour ce premier test, le seuil de $R^2 > 0,5$ sera considéré ici (Tritah et Daoud, 2021 ; Mbow *et al.*, 2013).

Éviter la prédiction de valeurs négatives avec \ln (nombre de bulls)

Une des limites du modèle PLS actuel est qu'il prédit des valeurs négatives, qui sont transformées en zéro dans l'analyse, car biologiquement, il n'est pas possible d'obtenir le résultat « - x » bulls. Afin d'éviter cette approximation, l'utilisation du logarithme sur le nombre de bulls va être testée afin d'obtenir uniquement des estimations de bulls positives. La formule utilisée sera : $\ln(1 + \text{nombre de bulls})$ car certaines nuits dépouillées ne présentent aucun bull. Le traitement par l'exponentielle permettra ensuite de retrouver le nombre de bulls prédits par nuit. Ce test est réalisé uniquement sur l'année 2025 avec le nombre de bulls entendus une nuit sur deux.

1.4. Impact du changement climatique sur l'activité de reproduction des aloses

1.3.1. Homogénéisation des données entre 2014 et 2025

Changement du matériel

Jusqu'en 2024, le matériel d'enregistrement utilisé pour recueillir les bulls sur la frayère de Taillebourg était un enregistreur OLYMPUS muni d'un micro intégré à une parabole. En 2024, le dispositif d'enregistrement SMM a été déployé en parallèle. Pour réaliser la transition entre les deux types d'enregistreurs, des tests ont été mis en place pour déterminer lequel des deux enregistreurs captait le plus de bulls et de combien de pourcents supplémentaires étaient captés. Il a été montré que le SMM captait 34,5 % de bulls supplémentaires par rapport à l'OLYMPUS (Guay, 2024). Ce facteur multiplicateur pourra donc être utilisé sur les bulls entendus les années précédentes où seul l'Olympus était utilisé. Une fois les prédictions faites selon les deux appareils et avec ce pourcentage, le nombre de bulls total sur la saison est obtenu pour l'OLYMPUS et la SMM. En comparant le nombre de bulls total obtenus avec les deux appareils, une différence de 10,6 % est observée sur ce total. De ce fait, il est possible de passer de l'un à l'autre via ce pourcentage sans refaire toutes les estimations de bulls.

Période de reproduction des aloses

Les variations de date de début et de fin de période s'expliquent principalement, pour la date de début, par la pose de l'enregistreur en fonction des conditions climatiques. À dire d'experts, une fois que les conditions climatiques (température de l'eau et débit) sont favorables à l'arrivée des aloses sur la frayère, l'enregistreur est posé. Cela fait donc varier la date de début d'enregistrement selon les années. En ce qui concerne la date de fin, elle varie selon si deux nuits consécutives dépouillées ne comptabilisent aucun bull, ou si des aléas de terrains interrompent l'enregistrement (cette année, une pile neuve mais défectueuse a coupé les enregistrements le 28 juin au lieu du 11 juillet, la date de fin visée). Ces deux données temporelles sont variables selon les années. Pour cette raison, les cinq premiers et cinq derniers pourcent (q5 et q95) de la population seront négligés (méthode des quantiles).

1.3.2. Facteurs principaux influençant la reproduction

De nombreux facteurs environnementaux peuvent influencer l'activité de reproduction (déjà constaté dans le calcul du nombre de géniteurs). Cependant, l'effet de certains facteurs est prépondérant sur les autres comme, par exemple, l'indice de temporalité (jour dans la saison), la durée du jour, la température de l'eau et le débit (Paumier, 2021). Déjà évoqué en introduction, la température de l'eau et le débit sont des facteurs initiateurs de la montaison et par conséquent, de la reproduction des aloses. Le débit peut être inhibiteur si une augmentation brutale survient (crue, fortes précipitations) (Observatoire des poissons migrateurs de Bretagne, [s d]), pouvant réduire voire stopper momentanément l'activité de reproduction. L'intervalle de température de l'eau favorable à la reproduction des aloses feintes se situe entre 18 et 22°C. Un autre intervalle est cité dans l'étude de Paumier, celui de 15-26°C. Beaucoup plus large que le premier, il va couvrir une grande partie de la période de reproduction, c'est pour cela que l'intervalle 18-22°C va être utilisé pour l'étude, intervalle qui pourra être élargi en fonction des observations. Cependant le seuil de 15°C peut être intéressant à creuser, en termes d'analyse, afin de déterminer si un changement de comportement reproducteur se produit à cette température, pouvant potentiellement être un déclencheur. L'objectif de l'étude est de tester ces fenêtres mais surtout de dégager des tendances sur l'effet de ces variables sur le comportement reproducteur des aloses.

Les analyses vont se porter principalement sur la courbe globale générée par l'évolution du nombre de bulls dans la saison. Le pic de bulls de la saison de reproduction sera analysé, de sorte à voir s'il diffère en temporalité au cours des années et si les conditions favorables de débit et de température de l'eau sont réunies à ce moment-là. La médiane, la moyenne, la variance, l'écart-type ainsi que la durée effective en jours (q95-q5) seront calculés sur l'intervalle. Pour ce faire, les dates vont être transformées en série séquentielle de chiffres, en considérant le 1^{er} janvier de chaque année comme le chiffre 1 (les années 2016, 2020 et 2024 sont des années bissextiles, la séquence sera alors décalée d'un jour).

La médiane reflète théoriquement le « pic » d'activité des aloses, donnant la date à laquelle 50 % des bulls de la saison ont été réalisés. La moyenne pondérée de la date en fonction du nombre de bulls correspond au centre temporel de l'activité de reproduction et le calcul de la variance pondérée associée montrera la dispersion de l'activité autour de cette moyenne grâce à son écart-type. Enfin, la durée effective entre q5 et q95 donne un indice de concentration temporelle de la période de reproduction. Pour plus d'homogénéité, les calculs seront réalisés sur les bulls prédits pour toute la saison (ne prends pas en compte les bulls entendus et les remplace par les prédictions obtenues par la méthode PLS).

2. Résultats

2.1. Nombre de géniteurs d'aloses feintes en 2025

2.1.1. Résultats bruts

Au cours de la saison 2025, 39 nuits ont été dépouillées sur la période du 11 avril au 27 juin 2025. Le nombre de bulls entendus par nuit va de 0 à un pic de 239 bulls le 28 mai 2025. Au total, 2863 bulls ont été recensés sur les 39 nuits écoutées (Figure 7). Cette année, 4,4 % des bulls entendus sont prédatés, ce qui représente 127 bulls au total. La répartition des bulls est irrégulière, avec une succession de trois pics d'activités le 02/05/25, le 16/05/25 et le 28/05/25. Cette irrégularité semble être corrélée à une évolution de la température qui augmente par vagues. La température de l'eau va

de 15,8°C en début de saison jusqu'à un maximum de 26°C le 27 juin, en fin de saison. Une baisse de température est visible à partir du 19 avril, liée à l'augmentation brutale du débit, qui atteint son maximum à 197 m³.s⁻¹, causée par la crue, avec des précipitations atteignant jusqu'à 23,7 mm/jour. Après cet évènement, le débit diminue constamment (fortement puis faiblement) jusqu'à la fin de la reproduction pour atteindre 51 m³.s⁻¹.

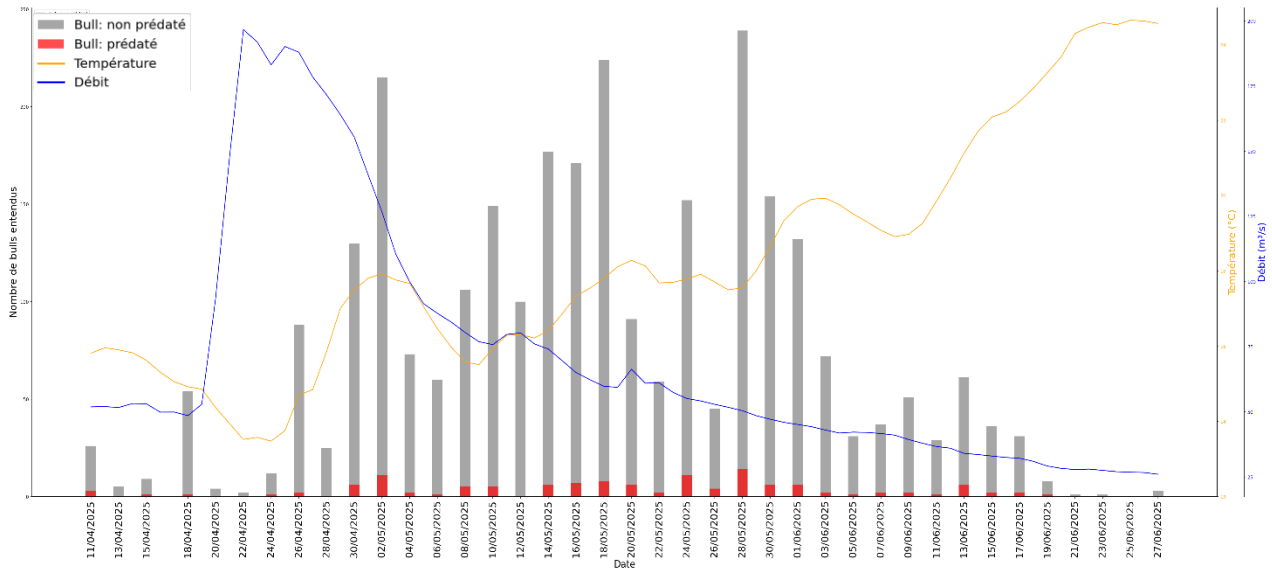


Figure 7. Graphique de l'évolution du nombre de bulls entendus en fonction de la température de l'eau (en °C) et du débit (en m³.s⁻¹).

En regardant plus spécifiquement la répartition des bulls cumulés en fonction du quart d'heure par nuit, cela confirme que la distribution des bulls au cours de la nuit suit une loi de Poisson (Figure 8). Le nombre de bulls augmente progressivement à partir de 23h00 pour atteindre un pic entre 1h30 et 1h45, avec un total cumulé de 415 bulls. L'activité de reproduction des aloses se concentre principalement entre 00h30 et 2h45, et s'affaiblit progressivement jusqu'à 5h45 où le nombre de bulls entendus sur toute la saison est proche de zéro.

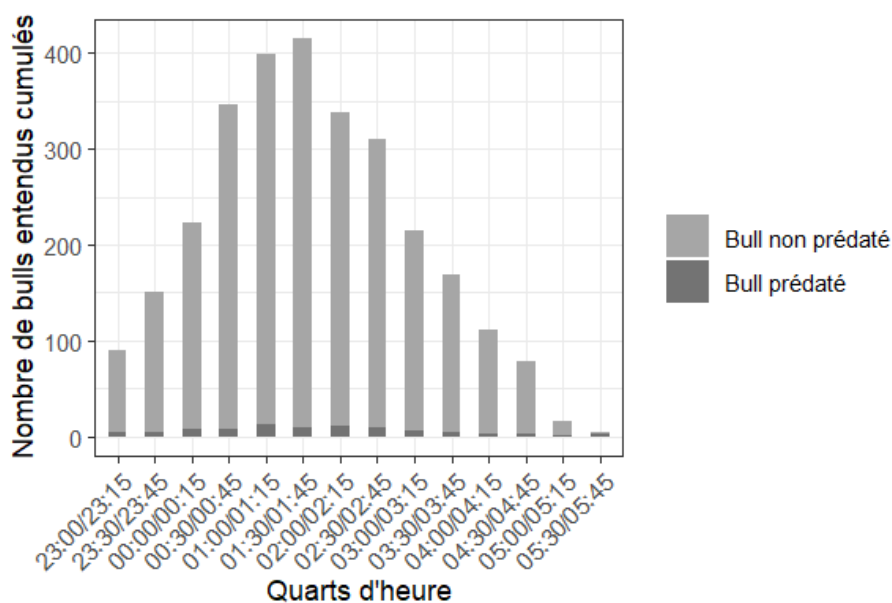


Figure 8. Nombre de bulls entendus cumulés par quarts d'heure dépouillés sur la période 11 avril – 28 juin 2025.

2.1.2. Résultats manquants

Prédiction des nuits manquantes

Tableau 1. Estimation du nombre de bulls sur les nuits manquantes (IC 95 = Intervalle de confiance à 95 %).

	] IC 95	Estimation	IC 95 [	Marge d'erreur relative
Nombre de bulls entendus	/	2 863	/	/
Nombre de bulls total après prédiction	4 368	5 731	7 399	29 %

En additionnant le nombre de bulls prédits sur les nuits manquantes aux bulls entendus sur les nuits dépouillées, un total de 5731 bulls est estimé avec la méthode PLS (Tableau 1).

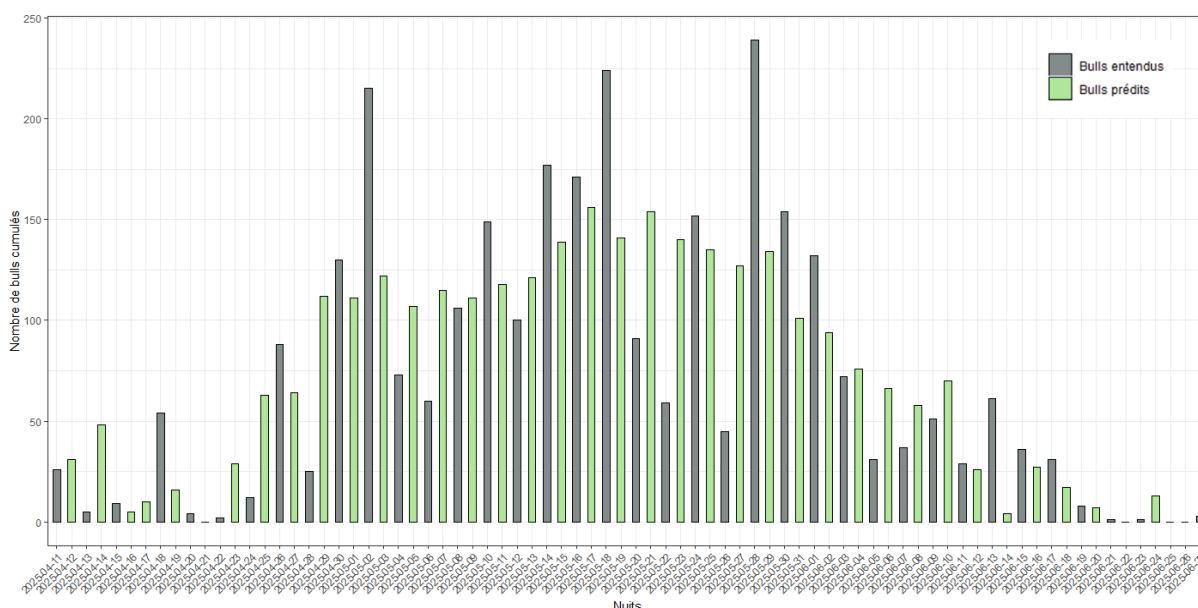


Figure 9. Représentation graphique des prédictions de bulls par nuits manquantes (en vert) et des bulls entendus sur les nuits écoutées (en gris).

Lors de la prédiction PLS, l'utilisation de l'indice de « Variable Importance in the Prediction » (VIP) permet de connaître quelles sont les variables explicatives qui ont le plus d'importance dans le modèle de régression (indice VIP > 1).

Tableau 2. Indice VIP du modèle PLS à 3 composantes pour la prédiction du nombre de bulls des nuits manquantes (abréviations : voir figure 5).

	Comp 1	Comp 2	Comp 3
Température de l'air moyen	0.008	0.018	0.042
Diff_T_eau_24h	0.003	0.0029	0.002
Diff_T_eau_48h	0.0057	0.0057	0.005
Diff_T_eau_72h	0.0058	0.0058	0.0047
Luminosité lunaire	0.12	0.14	0.053
Débit	0.17	0.23	0.33
Diff_débit_24h	0.13	0.12	0.10
Diff_débit_48h	0.25	0.24	0.23
Diff_débit_72h	0.37	0.36	0.40
Coefficient marée	0.11	0.12	0.10
Pluviométrie	0.007	0.006	0.019
Pression atmosphérique à 21h	0.22	1.56	2.61

Tendance p_atm sur 24h	3.42	2.92	1.51
Variable temporelle	1.46	1.65	2.036
Température de l'eau	0.92	0.99	1.19

La pression atmosphérique ainsi que sa tendance sur 24h, la variable temporelle et la température de l'eau sont les quatre variables explicatives qui ont le plus de poids dans le modèle de régression. Ce sont ces quatre variables qui ont le plus d'importance dans l'estimation du nombre de bulls (Tableau 2). Enfin, la précision du modèle par rapport aux valeurs de bulls entendus est déterminée par le coefficient de détermination $R^2 = 0,63$.

Prédiction des quarts d'heure manquants

Tableau 3. Prédiction des bulls sur les quarts d'heure manquants et calcul du coefficient multiplicateur.

	] IC 95	Estimation	IC 95 [	Marge d'erreur relative
Nombre de bulls entendus	/	2 863	/	/
Nombre de bulls prédits	2 630	2 929	3 096	/
Coefficient multiplicateur	1.92	2.02	2.08	/
Total de bulls après multiplication	8 380	11 594	15 400	32 %

Le nombre de bulls obtenus précédemment est multiplié par le coefficient multiplicateur estimé par la méthode GLM (Tableau 3). La prédiction permet d'obtenir une vision de l'évolution du nombre de bulls au cours des nuits, confirmant la loi de Poisson suivie (Figure 10).

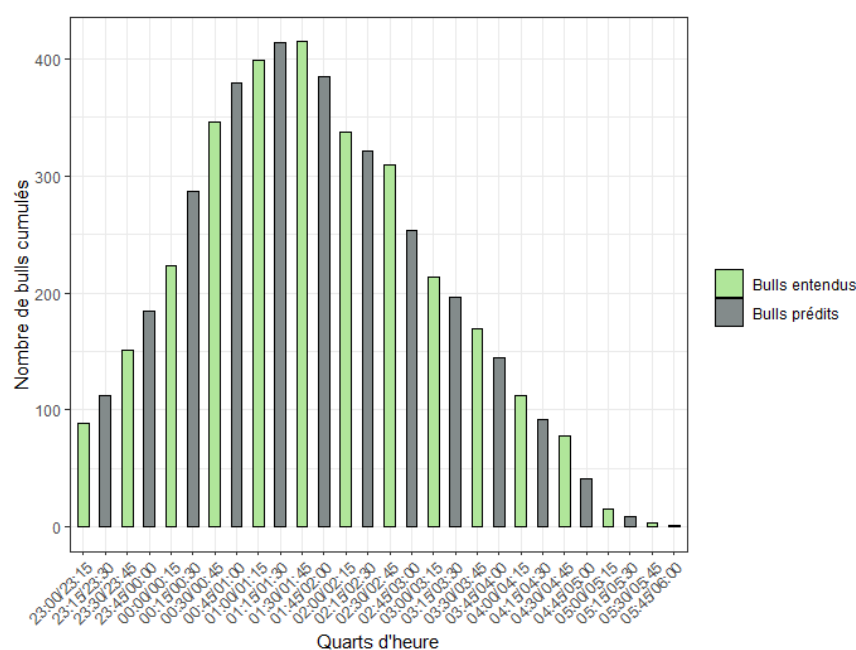


Figure 10. Représentation graphique du nombre de bulls cumulés par quarts d'heure (entendus et prédits).

Calibration

Cette dernière étape du calcul permet d'obtenir le nombre final de bulls sur les nuits entre le 11 avril 2025 et le 27 juin 2025. Au total, 21 107 bulls sont estimés pour l'année 2025 (Tableau 4).

Tableau 4. Correction du nombre de bulls final par calibration.

	] IC 95	Estimation	IC 95 [	Marge d'erreur relative
Équations de régression	$y = 1.35x - 8.55$	$y = 1.82x - 0.35$	$y = 2.29x + 7.84$	/
Total de bulls après correction	11 341	21 107	35 222	67 %

Estimation du nombre de géniteurs

Tableau 5. Nombre de géniteurs estimés pour l'année 2025.

	] IC 95	Estimation	IC 95 [	Marge d'erreur relative
Nombre de géniteurs estimé	2 268	4 221	7 044	67 %

En 2025, 4 221 géniteurs sont donc recensés sur la frayère de Taillebourg entre le 11 avril et le 27 juin, à l'aide de l'enregistreur SMM (Tableau 5). Grâce au coefficient calculé en 2024, le nombre de géniteurs peut être recalculé chaque année si l'étude était réalisée avec l'enregistreur SMM. Les résultats de 2025 peuvent donc être comparés avec ceux des 15 dernières années (Figure 11).

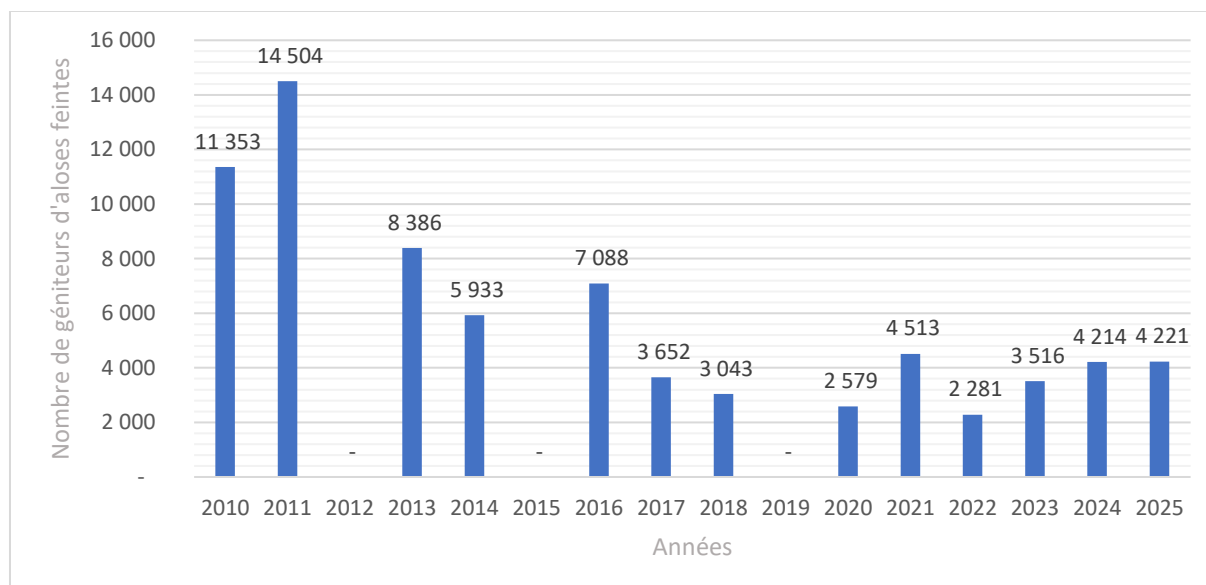


Figure 11. Histogramme de l'évolution du nombre de géniteurs d'aloses feintes sur la frayère de Taillebourg au cours du temps.

Depuis 2011 jusqu'à 2022, une tendance à la baisse est visible. La population d'aloses feintes venant se reproduire sur la frayère de Taillebourg ne cesse de décliner. Cependant, à partir de 2023, une tendance légèrement à la hausse apparaît et se maintient, avec un palier depuis 2024. Les années 2012, 2015 et 2019 restent sans résultats car le suivi n'a pas pu être réalisé.

2.2. Choix du rythme d'écoute des données acoustiques

Résultats pour un rythme d'une nuit dépouillée sur 4

En suivant exactement les mêmes étapes de calculs mais avec une nuit sur quatre de dépouillée, 22 699 bulls sont estimés sur la même période, soit un total de 4 540 individus qui se seraient reproduits sur la frayère (Tableau 6).

Tableau 6. Étapes de calculs du nombre de bulls et de géniteurs d'aloses si une nuit est écoutée sur 4.

Prédiction des nuits manquantes	] IC ₉₅	Estimation	IC ₉₅ [	Marge d'erreur relative
Nombre de bulls entendus	/	1 548	/	/
Total de bulls après prédiction	4 580	6 273	8 456	35 %
Prédiction des quarts d'heure manquants				
Nombre de bulls entendus	/	1 548	/	/
Nombre de bulls prédits	1 378	1 529	1 718	/

Coefficient multiplicateur	1.89	1.99	2.11	/
Total de bulls après multiplication	8 657	12 469	17 842	43 %
Calibration				
Équation de régression	$y = 1.35x - 8.55$	$y = 1.82x - 0.35$	$y = 2.29x + 7.84$	/
Total de bulls après correction	11 715	22 699	40 807	80 %
Nombre de géniteurs estimé	2 243	4 540	8 161	80 %

Les résultats estimés se basent sur une PLS à 3 composantes. La régression linéaire entre bulls entendus et bulls prédits permet d'obtenir un $R^2 = 0,74$, plus élevé que celui pour une nuit sur 2. Cependant, ce rythme d'écoute offre une estimation du nombre de géniteurs qui est supérieure de 7% par rapport à une nuit sur 2.

Résultats pour un rythme d'une nuit dépouillée sur 6

Lorsqu'une nuit sur 6 est écoutée, 20 526 bulls sont estimés sur la même période, soit un total de 4105 individus qui se seraient reproduits sur la frayère (Tableau 7).

Tableau 7. Étapes de calculs du nombre de bulls et de géniteurs d'aloses si une nuit est écoutée sur 6.

Prédiction des nuits manquantes	] IC ₉₅	Estimation	IC ₉₅ [	Marge d'erreur relative
Nombre de bulls entendus	/	1 004	/	/
Total de bulls après prédiction	4 393	5 555	7 230	30 %
Prédiction des quarts d'heure manquants				
Nombre de bulls entendus	/	1 004	/	/
Nombre de bulls prédits	878	1 035	1 130	/
Coefficient multiplicateur	1.87	2.03	2.13	/
Total de bulls après multiplication	8 238	11 282	15 363	36 %
Calibration				
Équation de régression	$y = 1.35x - 8.55$	$y = 1.82x - 0.35$	$y = 2.29x + 7.84$	/
Total de bulls après correction	11 148	20 526	35 137	71 %
Nombre de géniteurs estimé	2 230	4 105	7 027	71 %

Dans ce cas-là, la PLS fait ses prédictions à l'aide de 4 composantes et avec une précision de $R^2 = 0,88$, plus élevée que les deux cas précédents (mais avec 3 fois moins de répétitions à comparer). Une différence de 2,8 % sur le nombre de bulls estimés est notable entre ce rythme et celui d'une nuit sur 2.

Récapitulatif

Les trois rythmes d'écoute présentent leurs avantages et inconvénients (Tableau 8). Le rythme d'une nuit sur 2 contient le plus de nuits fiables dans le sens où 39 nuits sont dépouillées mais le temps d'écoute est élevé et la précision du modèle est la plus faible. Le rythme d'une nuit sur 4 semble être le moins adapté bien que le temps d'échantillonnage soit divisé par deux, le modèle a tendance à surestimer le nombre de bulls de 7 % et la marge d'erreur est la plus haute entre les trois essais. Enfin, le rythme d'une nuit sur 6 semble apporter une précision forte, avec un temps d'écoute le plus faible. Cependant, seulement 13 nuits sur 78 sont dépouillées, ce qui semble très faible et expliquerait l'augmentation de la précision du modèle qui n'a que 13 valeurs à comparer. Ce résultat révèle une dimension plus aléatoire de la méthode PLS et doit être pris avec du recul.

Tableau 8. Comparaison des différents rythmes de dépouillement des enregistrements selon différents critères.

	Nombre de nuits dépouillées	Temps total d'écoute (heure)	Composantes PLS	Nombre de géniteurs	Marge d'erreur relative
1 nuit sur 2	39	136.5	3	4 221	67 %
1 nuit sur 3	26	91	/	/	/
1 nuit sur 4	20	70	3	4 540	80 %
1 nuit sur 6	13	45.5	4	4 105	71 %

2.3. Précision du modèle PLS et pistes d'améliorations

Précision du modèle par comparaison des R²

Les coefficients de détermination constituent un bon indicateur de la force des prédictions établies par la méthode PLS depuis 2014 (Tableau 9). S'il est suffisamment élevé, les résultats pourront être utilisés pour établir des tendances sans que la méthode utilisée ne soit elle-même un biais dans les interprétations qui émergeront. Depuis 2021, le nombre de variables explicatives a augmenté afin d'enrichir les prédictions avec de nouveaux facteurs qui pourraient influencer l'activité de reproduction et préciser ainsi les estimations. Malgré cela, les R² sont très variables depuis 2014 mais aussi depuis 2021. Le nombre de variables explicatives entrant dans le modèle ne semble pas avoir d'effet significatif sur la force des prédictions. Les années 2022, 2023 et 2024 ont le même nombre de variables et se sont appuyées sur un nombre de nuits dépouillées quasiment identiques, pourtant la précision du modèle varie de 0,47 à 0,94. La faiblesse du R² de 2024 peut en partie être expliquée par des trous dans les données conduisant à des prédictions par moyennes mobiles sur plusieurs nuits.

Tableau 9. Précision des prédictions PLS estimées avec le coefficient de détermination R² et confrontation avec le nombre de nuits écoutées ainsi que le nombre de variables explicatives intégrées au modèle.

Années	2014	2016	2017	2018	2020	2021	2022	2023	2024	2025
R ²	0.31	0.64	0.51	0.67	0.75	0.61	0.94	0.78	0.47	0.63
Nuits écoutées	22	10	14	16	20	25	26	23	25	39
Nombre de variables explicatives	8	7	8	12	9	18	16	16	16	15

Dans la suite de l'étude, il sera considéré que les R² supérieurs à 0,5 relèvent de prédictions plus fortes, permettant ainsi de poursuivre sur l'impact des conditions abiotiques sur le comportement reproducteur des aloses. Les années 2014 et 2024 seront exclues car elles présentent un R² trop faible, évitant de transmettre le biais produit par une mauvaise prédiction sur de futurs résultats.

Éviter la prédiction de valeurs négatives avec ln (nombre de bulls)

Lorsque le logarithme du nombre de bulls entendus est utilisé, la méthode PLS à 3 composantes estime un total de 20 337 bulls sur la saison (Tableau 10). En termes d'individus, cela représente 4 067 géniteurs. La régression linéaire entre bulls entendus et bulls prédits permet d'obtenir un R²= 0,65 (Annexe 3), légèrement plus élevé que dans le cas précédent (nombre de bulls sans passage en logarithme, 1 nuit sur 2). Cette méthode baisse considérablement la marge d'erreur relative, car il n'y a plus d'approximations de valeurs négatives par zéro, toutes les valeurs prédites sont conservées. Elle représente de façon plus fiable et réaliste la distribution du nombre de bulls sur la saison par rapport au cas précédent (Annexe 4).

Tableau 10. Étapes de calculs du nombre de bulls et de géniteurs d’aloses pour des prédictions faites à partir de $\ln(\text{nb_bull})$.

Prédiction des nuits manquantes	] IC ₉₅	Estimation	IC ₉₅ [	Marge d’erreur relative
Nombre de bulls entendus	/	2 863	/	/
Total de bulls après prédiction	3 493	5 522	5 761	4 %
Prédiction des quarts d’heure manquants				
Nombre de bulls entendus	/	2 863	/	/
Nombre de bulls prédits	2 630	2 929	3 096	/
Coefficient multiplicateur	1.92	2.02	2.08	/
Total de bulls après multiplication	6 703	11 171	11 990	7 %
Calibration				
Équation de régression	$y = 1.35x - 8.55$	$y = 1.82x - 0.35$	$y = 2.29x + 7.84$	/
Total de bulls après correction	9 069	20 337	27 425	35 %
Nombre de géniteurs estimé	1 814	4 067	5 485	35 %

2.4. Changement climatique et variations du comportement reproducteur

Dans cette étude, deux variables sur les quatre citées vont être analysées : la variable temporelle et la température de l’eau. Ces deux variables font partie des variables ayant eu le plus d’importance dans le modèle PLS de cette année, justifiant ce choix.

Évolution du comportement reproducteur dans le temps

La première étape de la réflexion est de regarder s’il y a une variation du comportement reproducteur dans le temps. C’est-à-dire, observer si la population d’aloses feintes a tendance à se reproduire de la même façon, ou alors plus tôt ou plus tard par rapport aux années précédentes (Tableau 11 ; Figure 12). La distribution du nombre de bulls au cours de l’intervalle suit une loi de Poisson, et démontre l’influence de la date sur la reproduction. L’intervalle calculé par [moyenne – écart-type ; moyenne + écart-type] représente la majorité de l’activité de reproduction des aloses sur la saison. La médiane du nombre de bulls, qui peut faire office de « pic » de bulls au cours de la saison (50 % des bulls comptabilisés) varie selon les années entre le 14 mai au plus tôt et le 26 mai au plus tard, représentant un intervalle de 12 jours. Le pic se concentre autour de la mi-mai. Le jour moyen d’activité diffère au maximum de 4 jours par rapport à la médiane, mais est identique à celle-ci dans la plupart des cas. Cette variation des dates représentant le pic ou la moyenne de l’activité de reproduction au cours du temps laisse penser que d’autres facteurs influencent la reproduction, en plus de la temporalité.

Tableau 11. Résultats des calculs de durée effective (en jours ; $q_{95} - q_5$), de médiane, de moyenne et d’écart-type (en jours) par année.

	2016	2017	2018	2020	2021	2022	2023	2025
Durée effective	49	58	53	60	54	54	51	45
Médiane	20 mai	14 mai	19 mai	25 mai	26 mai	15 mai	16 mai	18 mai
Moyenne	20 mai	13 mai	19 mai	21 mai	26 mai	15 mai	16 mai	17 mai
Ecart type	12.6	13.8	12.6	14.8	12.5	11.6	11.1	11.5
Intervalle	7 mai – 2 juin	30 avril – 27 mai	6 mai – 1 juin	7 mai – 5 juin	13 mai – 7 juin	3 mai – 26 mai	5 mai – 27 mai	6 mai – 29 mai

En 2017, la reproduction est la plus précoce (pic d'activité le 14 mai et jour moyen le 13 mai), suivie par les années 2022, 2023 et 2025 (Figure 12). L'année la plus tardive est 2021 avec un pic et une moyenne d'activité le 26 mai.

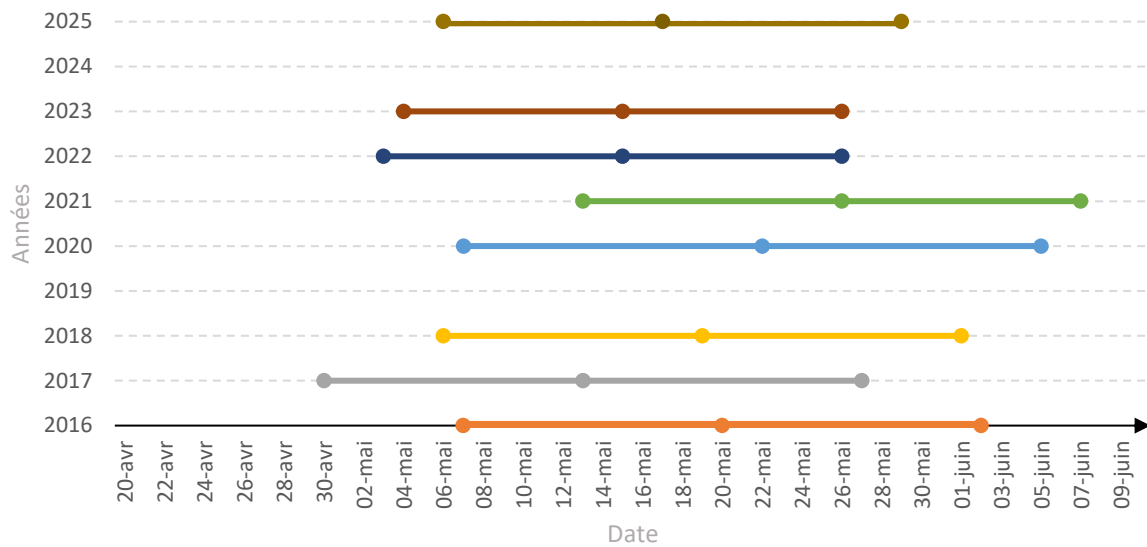


Figure 12. Représentation graphique des intervalles d'activité de reproduction par année selon la date (intervalle = [moyenne – écart-type ; moyenne + écart-type]).

Graphiquement, les années avec le plus de jours chauds (Teau > 22°C) ; (Annexe 6, Tableau 12), c'est-à-dire les années 2017, 2022, 2023 et 2025 sont celles où l'activité de reproduction commence le plus tôt. Tandis que les années aux températures plus basses (2016, 2018, 2020 et 2021) ont des périodes de reproduction plus tardives. Il serait alors intéressant de regarder plus précisément si la température de l'eau joue un rôle significatif sur la temporalité de l'activité de reproduction.

Effet de la température de l'eau sur l'activité de reproduction

D'après les résultats précédents, la température semblerait avoir un effet sur l'activité de reproduction. Elle aurait une importance dans la prédiction du nombre de bulls (cf. partie 2.1.2) et semblerait aussi influencer la temporalité de la période de reproduction. Dans un premier temps, l'effet de la température sur la temporalité de la reproduction est testé par un modèle linéaire de régression. Le jour moyen de l'activité calculé va être mis en relation avec la température moyenne sur la période associée de chaque année (Annexe 5). Les moyennes de températures des huit années considérées se situent dans la fenêtre 15-22°C. Seulement 3 années (2021-2022-2023) se situent dans la fenêtre favorable 18-22°C. L'hypothèse H0 est donc : la température a un effet significatif sur la temporalité de l'activité de reproduction des aloses. Cependant, l'hypothèse H0 n'est pas validée car la régression estime une p-value = 0,49 supérieure au seuil de 0,05 (Figure 13). La température n'a donc pas d'effet significatif sur la date moyenne d'activité de reproduction des aloses. Le R² associé tend vers 0.

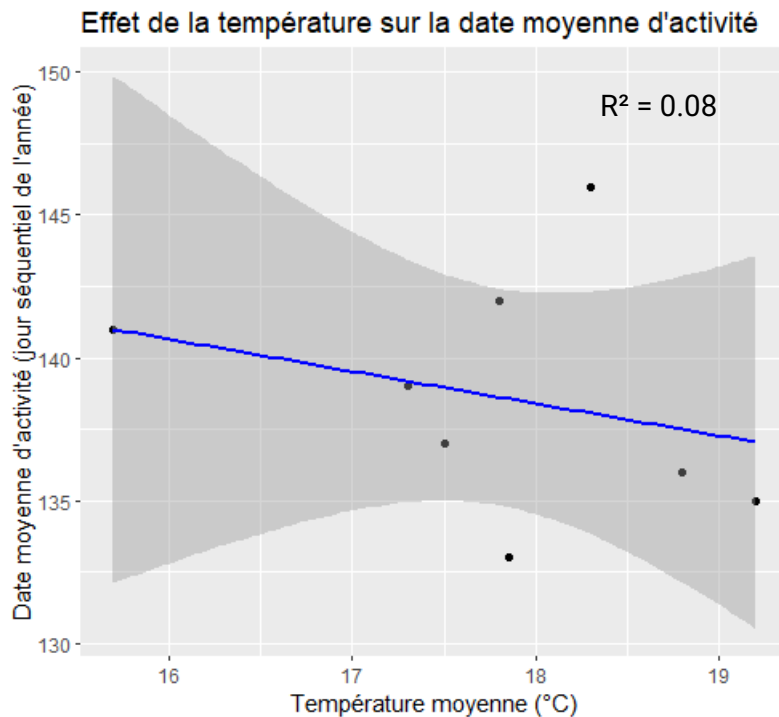


Figure 13. Graphique de régression linéaire de l'effet de la température de l'eau sur la date moyenne d'activité de reproduction des aloses feintes.

Si la température n'influe pas sur la temporalité de l'activité de reproduction de manière significative, elle semble tout de même avoir un effet sur le nombre de bulls au cours d'une saison de reproduction. Alors, dans un second temps et de façon plus qualitative, les fenêtres favorables de température recensées dans la bibliographie vont être étudiées. Quatre fenêtres sont identifiées et listées dans le Tableau 12. Une première vision globale sur le nombre de jours par intervalle de température selon les années peut être faite. La période sélectionnée se situe entre le 20 mars et le 9 juillet, car sur ces 11 années, ce sont respectivement les dates de bull le plus précoce et le plus tardif depuis 2014, englobant tout le reste. Les températures annuelles (Annexe 6) sont variables d'une année sur l'autre, mais une tendance à l'augmentation du nombre de jours avec une température supérieure à 22°C est visible depuis 2022 (excepté 2024 : année aux multiples crues). C'est-à-dire qu'il y a une augmentation du nombre de jours dits « trop chauds » pour que les aloses se reproduisent, réduisant la fenêtre temporelle accessible pour la reproduction, en théorie.

Tableau 12. Nombre de jours par intervalle de températures par année entre le 20 mars et le 9 juillet (Abréviation : Teau = Température de l'eau).

	2014	2016	2017	2018	2020	2021	2022	2023	2024	2025
22 < Teau < 26	5	0	31	7	2	6	20	39	0	25
18 < Teau < 22	28	22	24	42	40	33	42	9	33	20
Teau < 18	79	90	57	63	70	73	50	64	79	67
15 < Teau < 18	40	47	27	27	47	33	20	28	47	38
Teau < 15	39	43	30	36	23	40	30	36	32	29

À titre d'exemple, la Figure 14 présente l'évolution du nombre de bulls en fonction de la courbe de température pour l'année 2025. Visuellement, la forme de l'histogramme du nombre de bulls semble suivre la courbe de température de l'eau. Une augmentation de la température à partir du 24 avril 2025 est visible graphiquement, en parallèle d'une augmentation du nombre de bulls autour de cette même date. La majorité des bulls entendus sur les enregistrements de 2025 sont recensés à des températures inférieures à 18°C (2125 sur 2863 bulls). En 2025, seulement 20 jours se situent dans la fenêtre dite favorable de 18-22°C : 3 jours entre le 19 et le 21 mai et 17 jours entre le 29 mai et le 14

juin. Sur ces plages de dates, seulement 658 bulls ont été entendus. De plus, le nombre de bulls décroît à partir du 30 mai malgré une température dans la fenêtre favorable. En croisant ces données avec les résultats de temporalité, la durée effective de l'activité de reproduction prend fin le 29 mai 2025. À partir de cette date, le nombre de bulls décroît par effet de la date. Une complémentarité des effets entre l'indice temporel et la température de l'eau apparaît peut-être alors, bien que l'effet de l'un sur l'autre ne soit pas significatif statistiquement sur l'échantillon exploité.

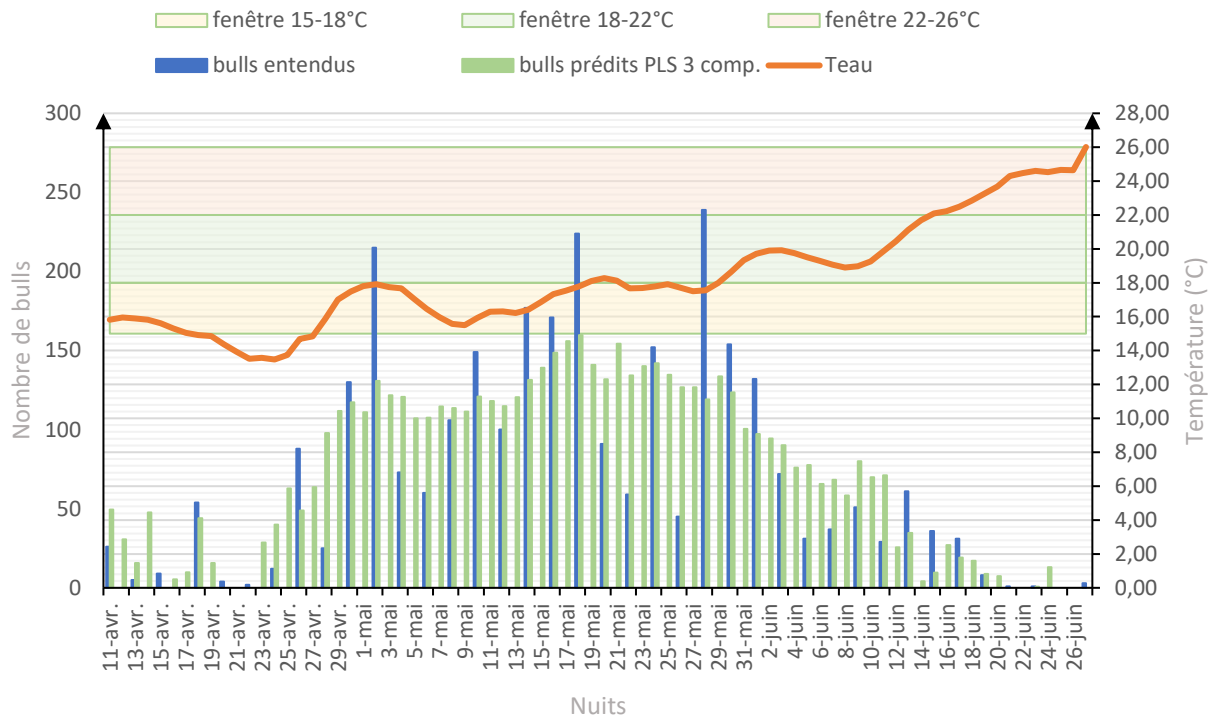


Figure 14. Graphique du nombre de bulls (entendus ou prédits) par nuit en 2025, en fonction de la température moyenne de l'eau et des différentes fenêtres de température favorables (15-18/18-22/22-26°C).

3. Discussion

3.1. Nombre de géniteurs et hypothèses de l'étude

Le nombre de géniteurs visitant la frayère de Taillebourg depuis 2010 a grandement décliné. Bien qu'une légère augmentation soit perçue depuis 2023, l'ordre de grandeur de la population d'aloses feintes reste faible (entre 3000 et 4000 individus). La première limite de cette étude est la base de données accessibles. Les premières données acquises en Charente datent de 2009-2010 et il n'y a pas de connaissances quantitatives sur les populations historiques de la Charente. Néanmoins, en 2019, l'EPTB Charente a estimé le nombre d'aloses feintes maximum que pourrait accueillir la Charente (en s'affranchissant des paramètres abiotiques, des ouvrages et de la prédation) afin d'obtenir une référence sur laquelle replacer le nombre d'aloses feintes réellement recensé. De ce fait, 213 500 aloses feintes pourraient occuper la Charente, dans des conditions optimales, d'après ce calcul. Les résultats actuels sont très loin de cet état optimal. Bien que l'estimation ne se fasse que sur une unique frayère, le déclin de la population d'aloses feintes est bien observable.

Le temps de maturité sexuelle moyenne chez les aloses feintes est d'environ 4 à 5 ans. Si l'on considère cette durée, il est possible d'estimer si l'année qui arrive va accueillir plus ou moins de géniteurs que l'année précédente, en regardant les effectifs de géniteurs 5 ans plus tôt. Cette hypothèse semble fonctionner pour l'année 2021 qui recensait un pic de population avec 4 513 géniteurs (Figure 11) et 5 ans avant, en 2016, 7 088 géniteurs étaient venus se reproduire sur la frayère. Bien que cette donnée

biologique semble avoir un réel effet dans le temps, cette hypothèse ne se vérifie pas à chaque fois, car d'autres paramètres entrent en jeu, dont les débits et températures observés durant l'année de montaison des géniteurs. Pour suivre l'évolution des pontes et estimer la survie des œufs afin d'estimer la production en aloses du bassin et tenter de prédire combien de géniteurs viendront se reproduire 4-5 ans plus tard, la CMCS a lancé un suivi des aloses dont le premier s'est déroulé sur les années 2023 et 2024.

Le nombre de géniteurs calculés dans cette étude repose sur des hypothèses tirées d'études des années 1980-1990 (Chanseau *et al.*, 2005 ; Dartiguelongue, 1996 ; Cassou-Leins *et al.*, 1981). Datée d'une trentaine d'années, et au vu des évolutions des conditions climatiques et de l'adaptation des espèces, il serait très intéressant de réaliser une mise à jour de ces hypothèses. Malheureusement, l'état des connaissances actuelles ne permettent pas de confirmer ou d'infirmer la véracité de ces hypothèses et celles-ci sont conservées dans la méthode de calculs. Cette étude étant reconduite tous les ans sur la même base, il est possible d'analyser les tendances au cours du temps, et cet élément est utile pour gérer une espèce sur le moyen et le long terme. En 2018, C. Tentelier propose une étude de ces hypothèses sur le bassin de la Nivelle, sur les grandes aloses (Tentelier, 2018). Il essaie principalement d'évaluer le nombre de bulls réalisés par individu au cours d'une saison, nécessaire dans le calcul final du nombre de géniteurs. Les aloses sont équipées d'accéléromètre, permettant d'identifier clairement la réalisation d'un bull. Seulement huit grandes aloses ont permis d'obtenir des données analysables avec un nombre de bulls allant de 7 à 26 bulls par individu, soit une moyenne de 15,375 bulls, supposant une variabilité par rapport à l'hypothèse de 10 bulls/femelle. Une surestimation du nombre de géniteurs avec les hypothèses initiales est donc probable. Cependant, l'étude repose sur un échantillon très faible, et nécessiterait d'être répétée sur plus d'individus, plusieurs années consécutives avec des conditions environnementales variées et bien décrites et sur plusieurs bassins versants. La réalisation de ce suivi sur des aloses feintes serait pertinente également. De plus, cette hypothèse sur le nombre de bulls par femelle, proposée par Dartiguelongue en 1996 a été reprise par d'autres scientifiques au cours du temps (Chanseau *et al.*, 2005 ; Belaud *et al.*, 2001). La majorité des études l'utilisent donc comme référence pour les calculs sur la reproduction des aloses. Néanmoins, la source initiale du rapport n'est pas retraçable informatiquement, il est donc difficile d'évaluer cette valeur de 10 pontes par femelle, car il n'est pas possible de savoir ce qu'elle représente, ni comment elle a été mesurée.

Enfin, il est important d'avoir conscience que le nombre de géniteurs d'aloses calculé est un indice d'abondance relative, lié à l'abondance réelle. Les marges d'erreur relatives n'ont donc pas réellement de valeurs et ne sont pas très fiables. Cet indice d'abondance relative reste très utile pour la conservation des populations d'aloses feintes sur la Charente. C'est un bon indicateur pour évaluer les tendances d'évolution des populations sur les frayères. Cependant, il serait peut-être plus correct de considérer seulement le nombre de bulls final avec l'hypothèse que la variation de bulls est positivement corrélée à la variation du nombre de géniteurs, étant donné qu'une relation linéaire les relie (Annexe 7). Les tendances des deux cas sont identiques, plus il y a de bulls, plus il y a de poissons. En effet, décrire uniquement un nombre d'individus final intègre l'imprécision de l'hypothèse « 1 femelle = 10 bulls », qui est évincée si l'on considère seulement les tendances évolutives du nombre de bulls dans les études. Cet indicateur « nombre de géniteurs » reste toutefois très intéressant dans le cadre de communications au grand public ou au département, pour la mise en place de mesures de gestion de la population.

3.2. Protocole de prédiction et rythme d'écoute des nuits

Cette année, une des dimensions de l'étude, en plus d'estimer le nombre de géniteurs d'aloses feintes sur la frayère, est de choisir un rythme de dépouillement des enregistrements qui allie robustesse de l'estimation et optimisation du temps d'écoute pour l'agent. Différents rythmes ont été testés à raison

d'un maximum d'une nuit sur 2. Les marges d'erreurs varient mais restent peu fiables, il n'est donc pas très judicieux de s'y fier complètement. Au final, seule une différence de 100 aines d'individus varie selon les prédictions des 3 rythmes testés : 4 105 pour 1 nuit sur 6, 4 540 pour une nuit sur 4 et enfin, 4 221 pour une nuit sur 2. L'ordre de grandeur des trois cas reste le même, les écarts du nombre de géniteurs restent négligeables. Il serait intéressant d'essayer le rythme d'une nuit sur 3 dans le futur afin d'avoir un comparatif avec ce rythme qui présente un nombre de nuits dépouillées conséquent mais avec un temps d'écoute de presque 40h de moins que pour une nuit sur 2. Ce dernier point n'est pas négligeable à l'échelle de l'agent chargé de cette tâche. Dans l'idéal, il faudrait tester ces rythmes de dépouillement sur plusieurs années afin d'observer si la différence varie d'année en année ou non. Si le résultat est stable et fiable, cela permettra de sélectionner un rythme à conserver chaque année, alliant précision du modèle et gain de temps. En attendant, la méthode actuelle et ses hypothèses restent tout de même cohérentes, les résultats d'une année sur l'autre sont comparables entre eux, malgré les différents biais évoqués, les estimations donnent un bon ordre d'idée du nombre d'individus présents lors de la période de reproduction. Cette étude vise à améliorer certaines étapes de calculs avec la méthode PLS afin de préciser les résultats existants.

La méthode PLS donne des résultats variables entre les années et entre le nombre de bulls entendus face à ceux prédits. Ces différences peuvent être dues à la variabilité du nombre de composantes établies, de l'évolution du choix des variables environnementales entre les années (plus de variables intégrées à partir de 2021) et de la variabilité du matériel biologique (les aloses elles-mêmes) dont le cycle de maturation des gonades n'est pas pris en compte. En effet, la méthode PLS se base uniquement sur des données abiotiques. Or, même si les conditions théoriques favorables à la reproduction ne sont pas réunies, les aloses se reproduiront plus ou moins, en suivant leur cycle biologique de maturation des gonades. De plus, les résultats des années passées, qui utilisaient l'OLYMPUS, présentent une variabilité au niveau de la taille de l'échantillon, du choix des nuits écoutées qui diffèrent d'une année sur l'autre. L'OLYMPUS pose une contrainte matérielle supplémentaire car l'enregistreur doit être posé et récupéré à chaque début et fin de nuit. La pose sur les différentes nuits a été choisie selon un rythme d'une fois par semaine puis de deux fois par semaine durant le pic de l'activité de reproduction (mi-mai à mi-juin). Cependant cela ne pouvait pas toujours être réalisable selon les conditions environnementales (crues, forts débits, orages), qui peuvent bloquer l'accès au point de pose de l'enregistreur, et selon les contraintes du calendrier (jours fériés, week-end). L'irrégularité et/ou le choix des poses peuvent donc impacter d'autant plus les résultats des prédictions et créer une variabilité entre les différentes années de suivi. L'introduction de la SMM est l'occasion d'affiner le protocole d'échantillonnage, homogénéisant le nombre de nuits écoutées chaque année. Son emplacement dans un arbre, en hauteur, lui donne l'avantage de ne pas être soumis aux conditions environnementales extrêmes et garantit un suivi continu au cours de la saison.

Cependant, en calculant les R^2 pour chaque année, une variation de la précision du modèle est visible. Ces variations ne proviennent ni du nombre de nuits dépouillées, ni du nombre de variables utilisées, car les R^2 varient toujours malgré une augmentation de ces deux paramètres. Peut-être cette variabilité vient-elle d'un mélange de ces différents paramètres réunis, mais ce qui est possible, c'est qu'elle provienne avant tout de la méthode utilisée. Cette variation pourrait également provenir du fait que le comportement des aloses n'apparaît pas dans les variables explicatives alors qu'elle a un effet sur la réalisation des bulls. Malgré tout, d'autres tests de prédictions peuvent être envisagés pour plus de précision sur le modèle. Par exemple, des modèles du type *Random Forest* ou même des modélisations bayésiennes pourraient être envisagés.

Une autre des limites observées lors de l'utilisation de la méthode PLS est la prédiction de valeurs négatives, biologiquement impossibles. Chaque année, une approximation a été faite, les valeurs négatives sont remplacées par des zéros en considérant qu'il n'y a pas eu de bulls de réalisés car il ne peut pas y avoir un nombre de bulls négatifs dans la nature. Cette approximation n'est pas aberrante mais contribue cependant à augmenter l'imprécision des prédictions et biaise les résultats. Pour

contourner ces prédictions négatives, l'idée d'utiliser le logarithme du nombre de bulls à la place semble naturelle. Cette méthode impose la prédiction de valeurs uniquement positives et le nombre de bulls final est retrouvé aisément en lui appliquant la fonction exponentielle. La précision des prédictions augmente car il n'y a plus lieu de faire des approximations. Le test a été réalisé seulement sur l'année 2025 mais il faudrait désormais appliquer cette correction aux années de suivi précédentes, pour que les résultats soient comparables entre eux.

Enfin, une dernière piste d'amélioration du protocole (au niveau dépouillement cette fois) serait l'utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA). De plus en plus présente dans la recherche, son utilisation apparaît aisément à l'esprit afin d'améliorer la vitesse de dépouillement des nuits, très chronophage actuellement. De nombreux projets de création d'IA spécialisées dans la détection de bulls d'aloses sur des enregistrements audios ont vu le jour ces dernières années. Les établissements de recherches et associations migrateurs sont sur le dossier avec, par exemple, l'EPTB Charente, qui depuis 2022 tente de développer l'application *Applibull* avec Polytech'Tours, capable à terme de détecter les portions d'enregistrements présentant un bull et de soumettre les portions « non reconnues » à l'agent pour validation. Cependant, il est encore difficile d'entraîner une IA performante, tellement le domaine est vaste et le signal à qualifier exigeant. L'application est actuellement utilisable sans IA (dépouillement classique en remplacement d'Audacity) et son développement continue. De nombreux progrès sont tout de même en cours. En effet, l'association Migrateurs Rhône-Méditerranée (MRM) a développé une application utilisant l'IA grâce à la méthode du Deep-Learning (MRM, 2021). Bien qu'encore en phase de test, leur IA arrive à détecter les bulls d'aloses avec une précision élevée. Il est donc probable de voir apparaître des projets aboutis d'ici les prochaines années, promettant une nette amélioration du traitement des lourdes données d'enregistrements et un gain de temps considérable sur cette étape du protocole. Cela permettrait d'envisager la pose d'enregistreurs de type SMM sur d'autres frayères afin d'évaluer la population d'aloses feintes, voir même de grandes aloses sur l'ensemble de la Charente.

3.3. Changement climatique et comportement reproducteur

La Charente est une zone d'étude des poissons migrateurs encore très récente à l'échelle de la France. Les suivis les plus anciens datent de 2009, à la création de la CMCS. Une étude des potentialités réalisée par l'EPTB Charente de 2000 à 2003 avait cependant permis de faire un premier état des lieux de l'état des populations des poissons migrateurs, des frayères potentielles et actives, des fronts de migrations et des ouvrages. Elle avait mis en évidence le très fort potentiel d'accueil de ce bassin versant et la nécessité de mettre en place une organisation pour s'occuper de la préservation de ces espèces. Cependant, cet intervalle de temps (2009-2025) ne permet pas d'avoir beaucoup de recul sur les résultats et les tendances commencent tout juste à se dessiner. Cependant, cela permet d'avoir un premier aperçu des effets des paramètres environnementaux sur le nombre de bulls et ne peut qu'inciter à continuer la prise de données et la recherche sur ce sujet.

La reproduction varie en temporalité au cours des années, pouvant être plus précoce ou plus tardive d'une année sur l'autre. Des pistes d'explications ont été testées, à savoir l'indice de temporalité et la température de l'eau. La variation d'activité des aloses dans le temps semble fortement liée aux variations de températures, cependant les tests ne démontrent pas de significativité entre les deux paramètres. Peut-être est-ce dû à un manque de données sur le long terme, car seulement 8 ans de données sont exploitables. À dire d'experts, il semblerait que la variation de la température en elle-même a plus d'impact sur le nombre de bulls que la valeur discrète de température. Si une chute de température apparaît, la reproduction semble diminuer fortement et inversement lorsque la température augmente. Cette hypothèse est une piste intéressante à creuser, en plus de la significativité de l'influence de la température de l'eau sur l'activité reproductrice. Des tests pour déterminer la significativité de l'effet de la température sur le nombre de bulls au cours d'une saison

de reproduction, ou d'autres facteurs environnementaux ayant une influence quelconque sur l'activité de reproduction des aloses peuvent être utilisés. Par exemple, il est possible d'utiliser le modèle additif généralisé (GAM), voir le modèle mixte additif généralisé (GAMM) ; (Legrand, 2021) dans le cas de l'indice temporel et de la température de l'eau qui ne réagissent pas de façon linéaire avec le nombre de bulls. Grâce à cette méthode, la significativité de chaque paramètre sera testée et une interprétation sur leurs effets pourra être exposée. Il serait intéressant de tester également le débit, bien qu'il n'apparaisse pas comme « important » dans le modèle de prédiction (Tableau 2). La bibliographie démontre son implication dans le déclenchement de la migration (et de la reproduction) et son effet sur l'activité reproductrice des aloses (Paumier, 2021).

Ces résultats préliminaires pourront être utiles pour l'approfondissement de futures études sur ce sujet. En effet, ils méritent d'aller plus loin dans l'interprétation. Cependant, il est difficile d'interpréter les effets distincts de chaque variable explicative à l'aide d'une méthode PLS. La multicollinéarité entre les différents paramètres entraîne une difficulté quant à l'interprétation des effets de chacun d'entre eux sur le nombre de bulls. La réflexion continue donc pour tester les différents facteurs un à un, en gardant en tête qu'une multicollinéarité lie bon nombre d'entre eux. Les résultats présentés sont donc une ébauche de réflexion et la discussion ici présente tente de donner des pistes pour la suite.

Enfin, il faut noter que les variations des facteurs environnementaux au cours du temps sont manifestement liées au changement climatique. Les effets liés à ces changements (augmentation de la température de l'eau, baisse des débits, crues, etc.) seraient en décalage avec les aloses, qui mettraient plus de temps à s'adapter par rapport à la vitesse de modifications de son environnement. Ces adaptations à retardement pourraient d'autant plus accentuer le déclin des aloses qui n'ont pas pu se déplacer, s'acclimater ou s'adapter et qui se prennent de plein fouet les variations brutales des paramètres abiotiques sans pouvoir les intégrer à l'échelle d'une seule génération (Legrand, 2021).

Conclusion et perspectives

La tendance évolutive de la population d'aloses feintes sur la frayère de Taillebourg se stabilise cette année, en concordance avec l'année 2024. Cependant, le pallier d'environ 4000 individus reste bien faible par rapport aux indices d'abondance d'il y a 15 ans (supérieurs à 10 000 individus). Cela démontre l'urgence de protéger cette espèce amphihaline, qui fait office de flux entre milieux marin et d'eau douce, et qui témoigne d'une bonne ou mauvaise continuité écologique selon son parcours de migration. Cette protection passe par la mise en place des moyens de gestion tels que des moratoires interdisant la pêche durant la période de reproduction (avril-juin), l'adaptation d'ouvrages bloquant à l'aide de dispositifs spécifiques afin de rétablir la continuité, l'amélioration de la qualité des habitats et de l'eau, l'effarouchement du silure pour limiter sa prédation ou encore la sensibilisation du grand public.

Bien que la méthode d'estimation du nombre de géniteurs d'aloses feintes sur la Charente soit utilisée depuis une dizaine d'années, des améliorations du protocole permettent de la faire évoluer pour la rendre plus robuste et précise. Cette année, la proposition est d'utiliser le logarithme du nombre de bulls pour réaliser la prédiction plutôt que d'utiliser uniquement le nombre de bulls, entraînant l'apparition de valeurs négatives, qui n'ont biologiquement pas de sens. Néanmoins, la précision obtenue actuellement répond aux objectifs du territoire, permettant d'obtenir un indicateur annuel d'abondance de l'alose feinte et des tendances à l'échelle de la population pour adapter *in fine* les mesures de gestion de l'espèce.

Il faut tenir compte que la plupart des résultats obtenus sur l'impact des conditions environnementales sur le comportement reproducteur sont à prendre avec précaution et un esprit critique car il faut être conscient que la méthode n'est pas parfaite et constitue elle-même un biais dans les tendances

dégagées. Cependant, ces essais ont permis d'observer un effet du temps sur l'activité de reproduction et semblent dégager une piste sur l'effet de la température de l'eau également, faisant office d'étude préliminaire et incitant alors à poursuivre les études sur ce sujet dans le futur. Le manque de connaissances sur cette espèce laisse place à des questions auxquelles il est difficile de répondre avec assurance, laissant seulement des hypothèses en suspens. Il serait donc intéressant de poursuivre l'étude sur ces espèces migratrices, aussi bien l'alose feinte que la grande alose, pour actualiser l'état des connaissances, voire pour réactualiser les hypothèses posées dans cette étude, datant des années 90 (nombre de pontes par femelle, sex ratio sur une frayère, durée entre les différentes pontes, etc.).

Des perspectives d'études peuvent aussi être envisagées sur la phase marine du cycle de vie des aloses, qui est encore méconnue. Bien que quelques données aient été relevés entre les prises accidentelles d'aloses en mer, cela reste anecdotique et éparse (Abdallah *et al.*, 2021). L'étude des pêches accessoires directement en mer, afin d'identifier l'espèce et la localisation précise de capture, ont été amorcées avec, entre autres, l'étude COMIMER. Ce type d'étude mérite d'être poursuivi pour compléter les connaissances préexistantes sur le stade de vie marine.

Bibliographie

Abdallah Y., 2020. *L'alose en France en 2020 : état des lieux des populations et tendances*. <https://www.truites-et-cie.fr/article/environnement-gestion/leurre-mouche-toc/alose-en-france-en-2020-etat-des-lieux-des> (Consulté le 7 janvier 2025).

Abdallah Y., Dufouil A., Charrier F., Berge J., Postic-Puivif A., Collet M.A., Albert F., et Buard E., 2021. *Etude des potentialités piscicoles sur les bassins Charente-Seudre - Etats et possibilités de migration des poissons migrateurs amphihalins des bassins Charente et Seudre*. Scimabio ; Fishpass ; EPTB Charente, 281 p.

Adam G., Tesseyre D., Reverdy H., Chanseau M., Chaumel A., Postic-Puivif A., Guerri O., Lauronce V., Carry L., Bosq S., Clave D., Caut I., Buard E., et Albert F., 2015. *PLAGEPOMI - Plan de gestion des poissons migrateurs Garonne - Dordogne - Charente - Seudre - Leyre*. 108 p.

André G., Guillerme N., Sauvadet C., Diouach O., Chapon P.-M., et Beaulaton L., 2018. *Synthèse sur la répartition des lamproies et des aloses amphihalines en France*. AFB ; INRA, 161 p.

Aprahamian M.W., Baglinière J.-L., Sabatié M.R., Alexandrino P., Thiel R., et Aprahamian C.D., 2003. *Biology, Status, and Conservation of the Anadromous Atlantic Twaite Shad *Alosa fallax fallax**. *American Fisheries Society Symposium*, (35), p. 103-124.

Aquaportail A., 2023. *Alosa (genre) : les aloses*. <https://www.aquaportail.com/especes/taxonomie/genre/1526/alosa> (Consulté le 19 août 2025).

Bancel S., Geffard O., Bossy C., Clérandeau C., Coynel A., Daramy F., Delorme N., Garnero L., Mazzella N., Millan-Navarro D., Mzali F., Pierron F., Recoura-Massaquant R., Rochard E., et Cachot J., 2025. *Active biomonitoring of river pollution using an ex-situ exposure system with two model species*. *Science of The Total Environment*, 959, p. 178159. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2024.178159

Baumann L., 2021. *Analysis of the ecology of the young stages of allis shad (*Alosa alosa*, Clupeidae): ecological preferences, sensitivity to environmental pressures and population restoration.* , 237 p.

Bekkai A., 2023. *Suivi des populations d'aloses sur le bassin versant de la Charente Suivi des pressions subies*. 46 p.

Belaud A., Carette A., Cassou-Leins F., et Cassou-Leins J.J., 2001. Choix des sites de fraie par la grande alose (*Alosa alosa*, L) en moyenne Garonne. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (362-363), p. 869-880. DOI : 10.1051/kmae:2001024

Bellier B., Bancel S., Rochard É., Cachot J., Geffard O., et Villeneuve B., 2024. Assessment of the impact of chemical pollution on endangered migratory fish in two major rivers of France, including spawning grounds. *Science of The Total Environment*, 931, p. 172748. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2024.172748

BOREA, 2019. *Projet DIADES : Diadromous fish and Ecosystem Services. Services écosystémiques et poissons migrateurs amphihalins face au changement climatique | Laboratoire de biologie des organismes et des écosystèmes aquatiques*. <https://borea.mnhn.fr/fr/projet-diades-diadromous-fish-and-ecosystem-services-services-%C3%A9cosyst%C3%A9miques-poissons-migrateurs> (Consulté le 21 mars 2025).

Brias T., 2014. *Suivi Alose 2014 : Ajustement du protocole de suivi et du calcul d'estimation des géniteurs d'aloses sur le bassin Charente Recherche du front de migration*. 52 p.

Cassou-Leins F., Cassou-Leins J.J., et Institut national polytechnique Toulouse, 1981. *Recherches sur la biologie et l'halieutique des migrateurs de la garonne et principalement l'alose : Alosa alosa L.*, 382 p.

Chanseau M., Castelnaud G., Carry L., Martin-Vandembulcke D., et Belaud A., 2005. Essai d'évaluation du stock de géniteurs d'alose *Alosa alosa* du bassin versant Gironde-Garonne-Dordogne sur la période 1987-2001 et comparaison de différents indicateurs d'abondance. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (374), p. 1-19. DOI : 10.1051/kmae:2004023

Charles K. et Jatteau P., 2010. Analyse de la sensibilité des jeunes stades de grande alose *Alosa alosa* aux facteurs de l'environnement: résultats 2009/synthèse 2008-2009: rapport final. , p. 49. DOI : hal-02596672

COGEPOMI, 2021. *Plan de Gestion des Poissons Migrateurs 2022-2027 Garonne-Dordogne-Charente-Seudre-Leyre*. 189 p.

Dartiguelongue J., 1996. *Suivi du déroulement de la fraie sur la frayère à aloses à l'aval de Mauzac (Dordogne) (Rapport S.C.E.A)*. 19 + annexes p.

Dubost G., Elliott S.A.M., Deleys N., Réveillac E., Rivot E., Acou A., et Beaulaton L., 2024. *Rapport du projet « MigrenMer » : Synthèse et valorisation des connaissances disponibles sur les migrateurs amphihalins en mer*. Office Français de la Biodiversité. , 233 p.<https://hal.inrae.fr/hal-04449323>

Elie P. et Baglinière J.-L., 2000. *Les aloses (Alosa alosa et Alosa fallax spp.): Écobiologie et variabilité des populations*. Quae, 296 p. ISBN 978-2-7592-1076-3

EPTB Charente, [s d]. *La préservation des poissons migrateurs*. <https://www.fleuve-charente.net/domaines/la-preservation-des-poissons-migrateurs> (Consulté le 7 avril 2025a).

EPTB Charente, [s d]. *Le bassin versant - EPTB Charente*. <https://www.fleuve-charente.net/notre-territoire/le-bassin-versant> (Consulté le 7 avril 2025b).

EPTB Charente, 2024. *Rapport d'activité 2023 EPTB Charente*. 44 p.

EPTB Charente, CAPENA, et MIGADO, [s d]. *Tableau de bord - Migrateurs Charente Seudre*. <https://www.migrateurs-charenteseudre.fr/> (Consulté le 7 avril 2025).

Guay C., 2024. *Suivi des populations d'aloses sur le bassin versant de la Charente en 2024 : migration, reproduction et pressions subies*. 55 p.

INRAe et OFB, 2022. *Projet de Plan National en faveur des Migrateurs Amphihalins*. 188 p.

Labeledan M., 2017. *Estimation du nombre de géniteurs d'aloses sur le bassin versant de la Charente*. 54 p.

Legrand M., Briand C., Buisson L., Besse T., Artur G., Azam D., Baisez A., Barracou D., Bourré N., Carry L., Caudal A., Corre J., Croguennec E., Der Mikaélian S., Josset Q., Le Gurun L., Schaeffer F., Toussaint R., et Laffaille P., 2020. Diadromous fish modified timing of upstream migration over the last 30 years in France. *Freshwater Biology*, 66 (2), p. 286-302. DOI : 10.1111/fwb.13638

Legrand M.H., 2021. *Les poissons amphihalins de France face au changement climatique : évolution des effectifs et modification de la phénologie migratoire*. (Ecologie fonctionnelle). Université de Toulouse. , 308 p.

Maitland P. et Hatton-Ellis T., 2003. Ecology of the Allis and Twaite Shad, *Alosa alosa* and *Alosa fallax*. *Conserving Natura 2000 Rivers Ecology Series No. 3*, , p. 32.

Mbow M., Ngom S., Diouf M., et Akpo L., 2013. Prédiction de la qualité fourragère des feuilles de *Sterculia setigera* Del. par la méthode de la Spectroscopie Proche Infra Rouge (SPIR). *Journal of Applied Biosciences*, 62 (0), p. 4628. DOI : 10.4314/jab.v62i0.85601

MIGADO, 2018. *Esturgeon européen*. <http://www.migado.fr/esturgeon-deurope/> (Consulté le 26 mars 2025).

Migrateurs Charente Seudre, [s d]. *Les bassins versants Charente et Seudre*. <https://www.migrateurs-charenteseudre.fr/presentation/les-bassins-versants-charente-et-seudre/> (Consulté le 1 août 2025).

MRM, 2021. *Suivre la reproduction de l'alose*. <https://www.migrateursrhonemediterranee.org/suivre-la-reproduction-de-lalose/> (Consulté le 18 août 2025).

Observatoire des poissons migrants de Bretagne, [s d]. *Aloses*. <https://www.observatoire-poissons-migrants-bretagne.fr/aloses> (Consulté le 5 août 2025).

Paumier A., 2021. *Ecological niche of allis shad during reproduction: consequences at the population level in a global warming context*. , 248 p.

Rech T., 2015. *Etude des impacts de la qualité de l'eau de la Garonne fluvio-estuarienne sur la dévalaison des alosons de Grande alose *Alosa alosa**. 79 p.

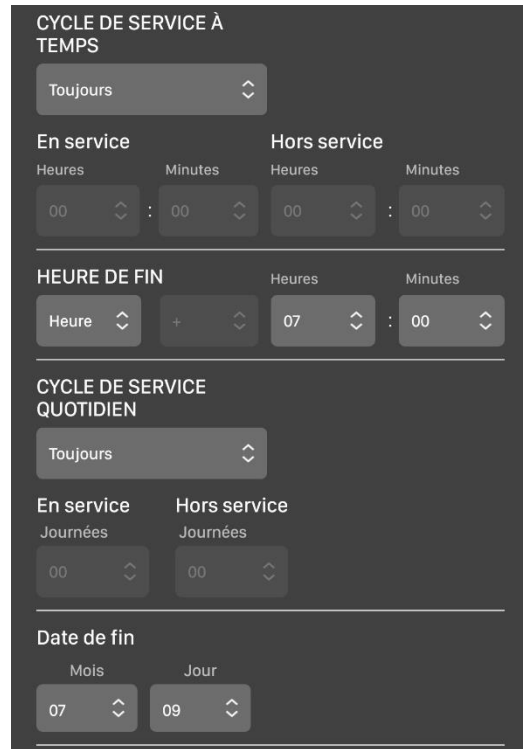
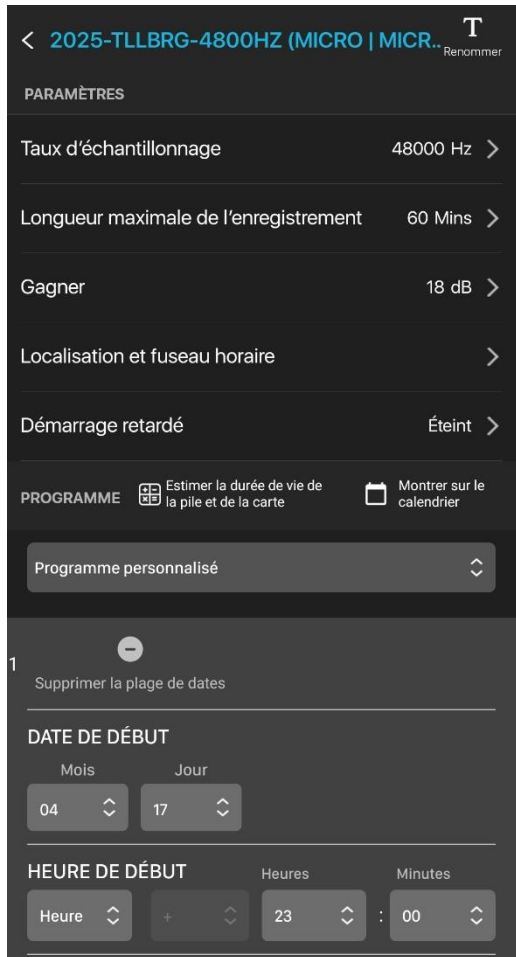
Rougier T., Lambert P., Drouineau H., Girardin M., Castelnaud G., Carry L., Aprahamian M., Rivot E., et Rochard E., 2012. Collapse of allis shad, *Alosa alosa*, in the Gironde system (southwest France): environmental change, fishing mortality, or Allee effect? *ICES Journal of Marine Science*, 69 (10), p. 1802-1811. DOI : 10.1093/icesjms/fss149

Tentelier C., 2018. *Optimiser l'estimation des effectifs de géniteurs d'alose par l'observation du comportement reproducteur individuel* (Hal-03198790). AFB; INRA, 33 p.

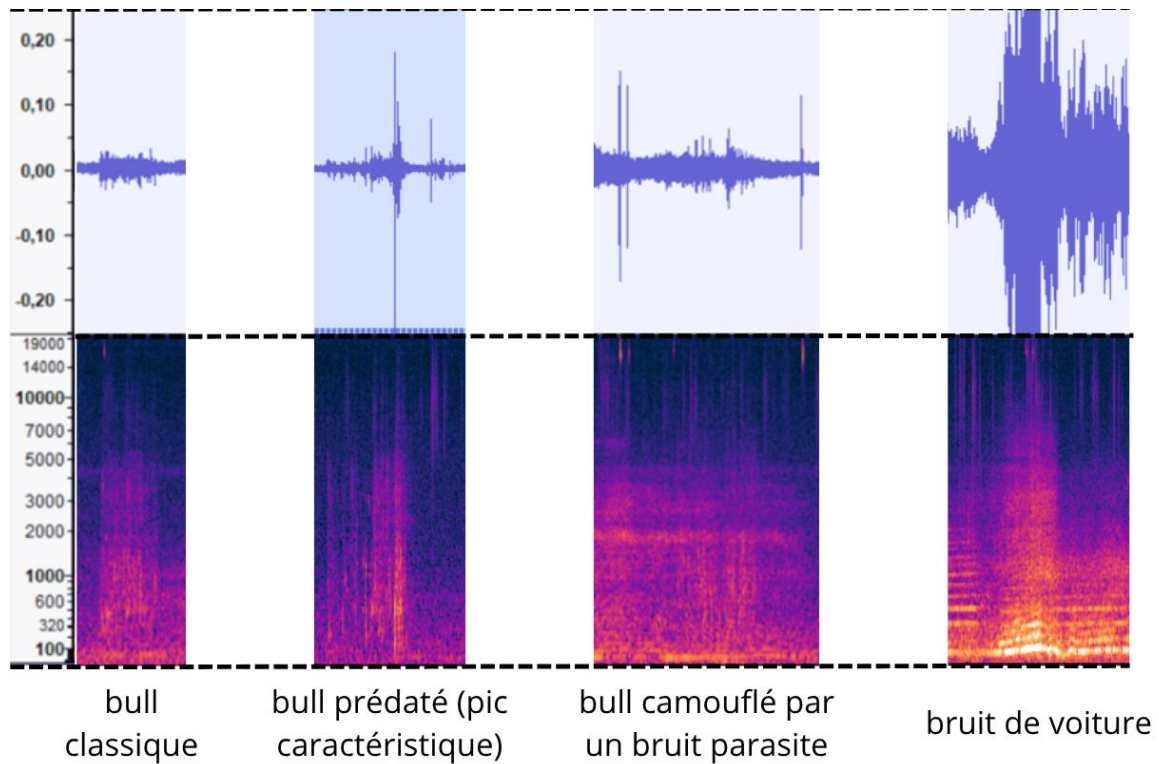
Tritah S. et Daoud M., 2021. Les fondements conceptuels et théoriques de la méthode des équations structurelles PLS. *International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics*, 2 (1), p. 378-395. DOI : 10.5281/ZENODO.4474527

Annexes

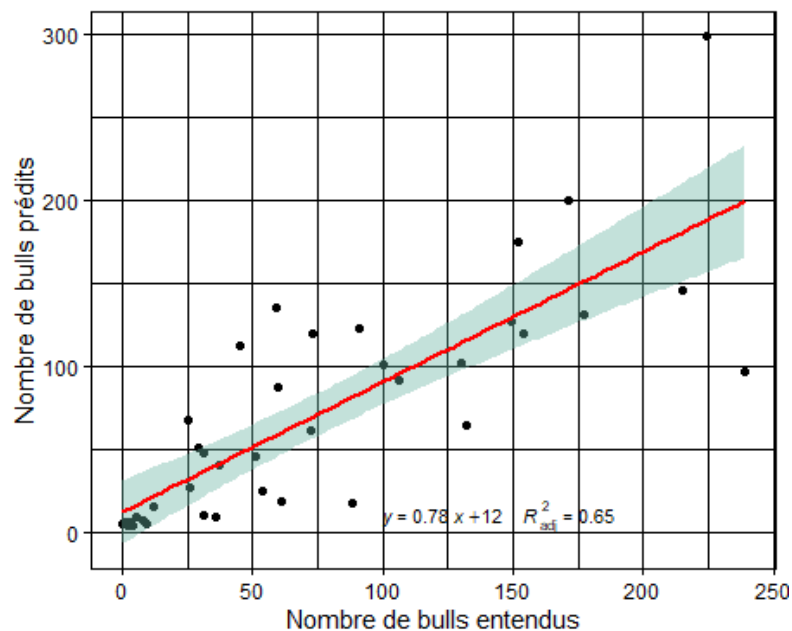
Annexe 1. Capture d'écran de l'interface de l'application Song Meter Micro pour configurer l'enregistreur en Bluetooth.



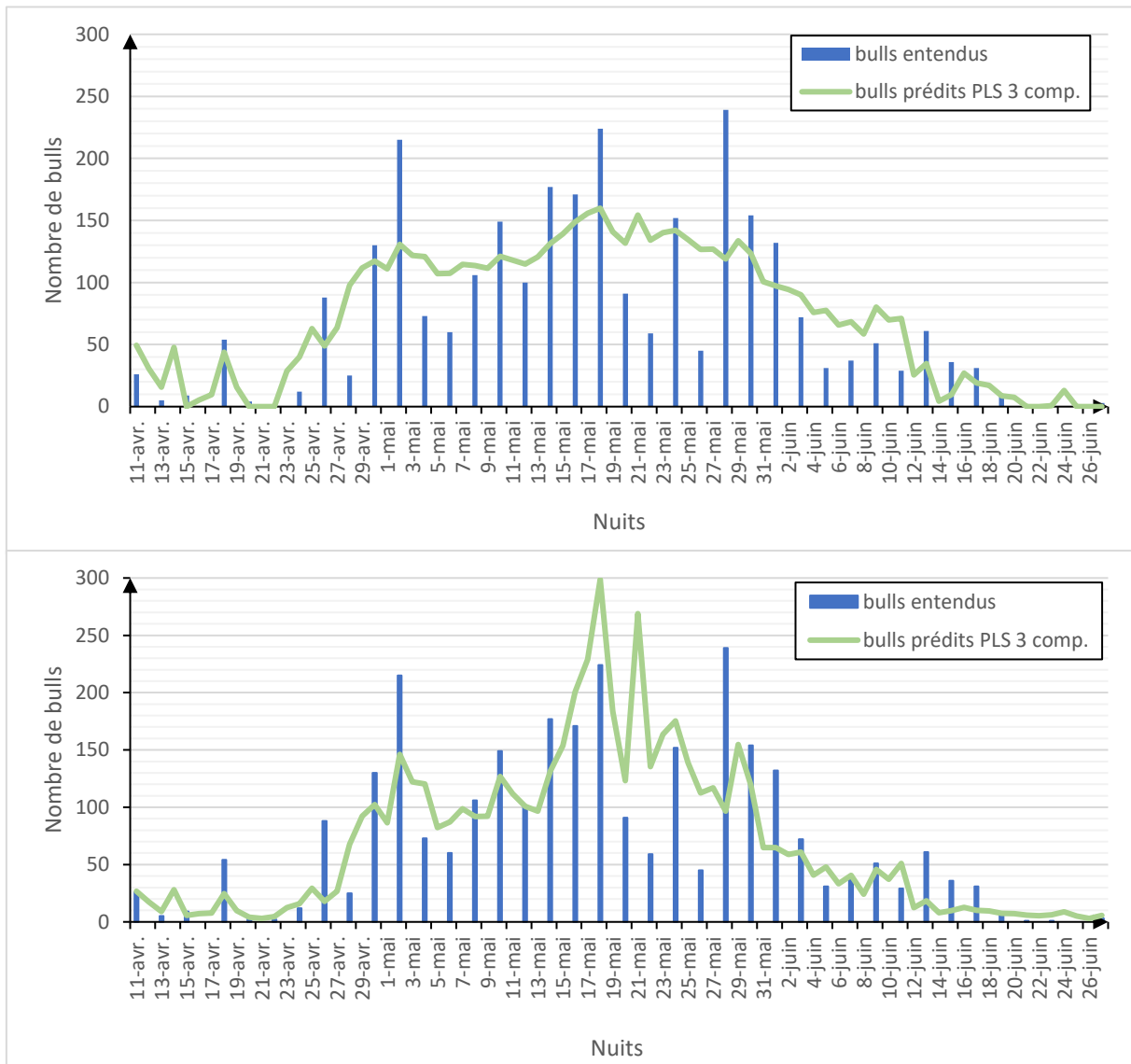
Annexe 2. Exemples de formes d'ondes (au-dessus) et de spectrogrammes (en-dessous) de bulls détectés (en Hz) sur Audacity©.



Annexe 3. Régression linéaire entre le nombre de bulls entendus et le nombre de bulls prédits avec la méthode utilisant le logarithme du nombre de bulls (R Studio).



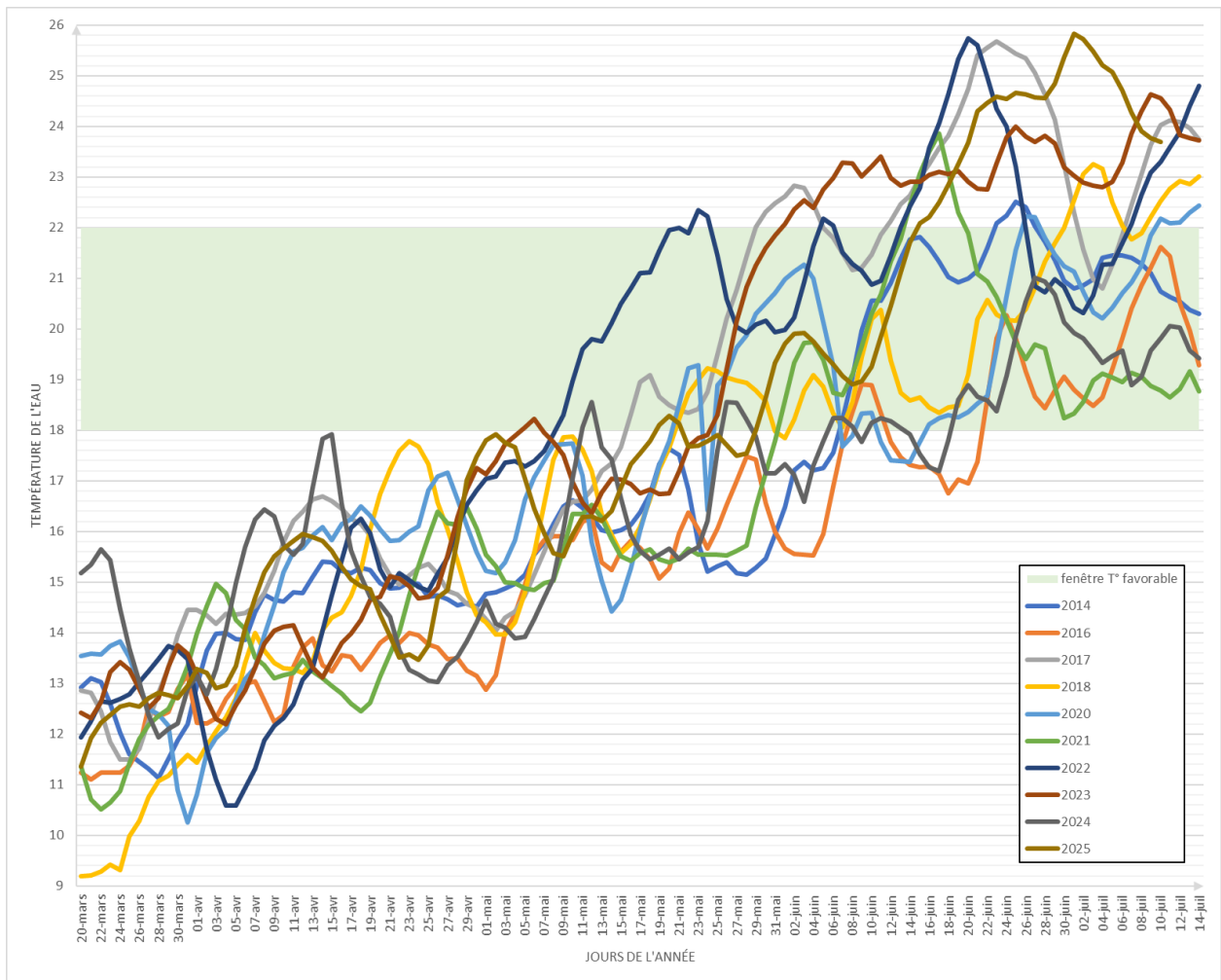
Annexe 4. Comparaison des prédictions PLS à 3 composantes entre la méthode utilisant le nombre de bulls entendus (au-dessus) et la méthode utilisant le logarithme du nombre de bulls entendus (en-dessous).



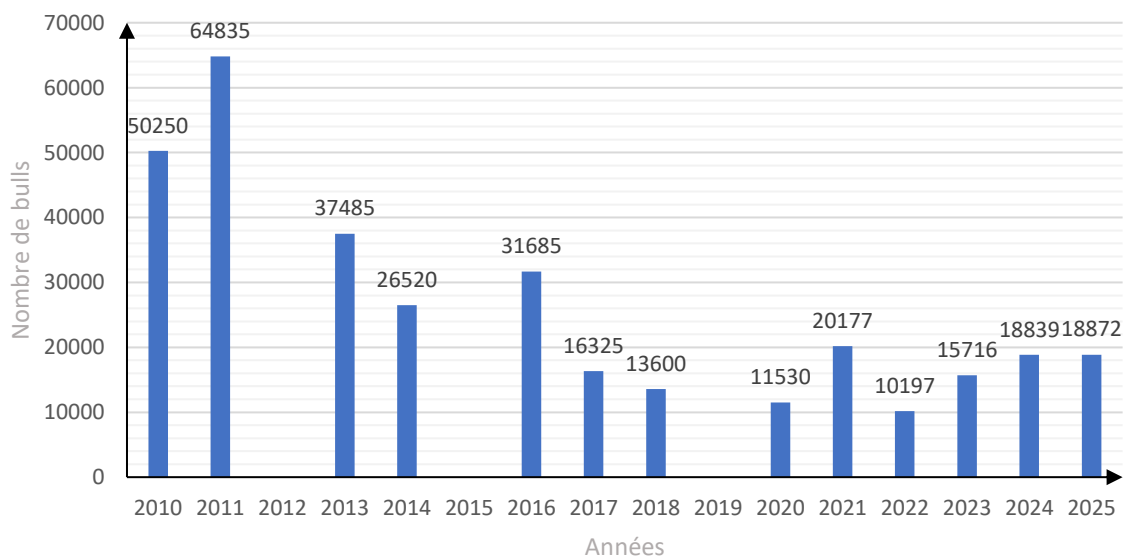
Annexe 5. Tableau des données utilisées pour la régression linéaire entre le jour moyen d'activité et la température moyenne associée à chaque période (cf. 2.4.).


annee	date	jour moyen d'activité	Teau_moy
2016	20-mai	141	15.7
2017	13-mai	133	17.85
2018	19-mai	139	17.3
2020	21-mai	142	17.8
2021	26-mai	146	18.3
2022	15-mai	135	19.2
2023	16-mai	136	18.8
2025	17-mai	137	17.5

Annexe 6. Évolution de la température moyenne de l'eau quotidienne et par année. Le rectangle vert représente la fenêtre de température favorable pour la reproduction des aloses (18-22°C) selon Arahamian *et al.* (2003).



Annexe 7. Histogramme du nombre de bulls estimés sur les saisons de reproduction d'alos feintes depuis 2010. (La tendance est identique à celle du nombre de géniteurs, tout en s'affranchissant du biais posé par l'hypothèse 1 femelle = 10 bulls.)



	Diplôme : Ingénieure Agronome Spécialité : Génie de l'Environnement Spécialisation / option : Protection et Aménagement des Milieux, Ecologie Quantitative (PAMEQ) Enseignant référent : Manuel Plantegenest
Auteur(s) : Alicia Girard Date de naissance* : 07/08/2003	Organisme d'accueil : EPTB Charente Adresse : 5 rue Chante-Caille, ZA les Charriers 17 100 SAINTES
Nb pages : 30 Annexe(s) : 7	
Année de soutenance : 2025	Maître de stage : Audrey Postic-Puivif
Titre français : « Suivi de populations d'aloses feintes sur la Charente : reproduction, indice d'abondance et impacts des facteurs environnementaux sur le comportement reproducteur » Titre anglais : "Monitoring of twaite shad populations in the Charente River: spawning, index of abundance, and impacts of environmental factors on spawning behaviour"	
Résumé (1600 caractères maximum) : L'alose feinte de l'atlantique-manche (<i>Alosa fallax</i>) est une espèce migratrice potamotique présente sur la Charente. Elle se développe en mer et vient se reproduire en eau douce sur les mois d'avril à juin. Afin de suivre la population, l'EPTB Charente a mis en place un suivi acoustique de la reproduction des aloses feintes sur la frayère de Taillebourg à l'aide de la détection des « bulls », son caractéristique de l'acte reproducteur. L'objectif est d'estimer le nombre de géniteurs présents sur la frayère à partir d'une méthode de régression Partial Least Square (PLS). Sur 39 nuits dépouillées, 2863 bulls ont été entendus, puis extrapolés et calibrés pour estimer un total de 21 107 bulls, correspondant à 4221 géniteurs. Mis en place depuis 2010, le suivi met en évidence une diminution du nombre de géniteurs au cours du temps. Cependant, une légère tendance à la hausse est observable depuis 2023, se stabilisant en un pallier en 2024-2025. L'analyse des variables environnementales montre que la température de l'eau ainsi que la temporalité saisonnière sont importantes dans la prédiction du nombre de bulls. L'étude sur la période 2014-2025 révèle un décalage de l'activité de reproduction vers des dates plus précoces qui semble être influencé par les variations des températures de l'eau, suggérant une influence du changement climatique sur le comportement reproducteur des aloses. Des pistes d'amélioration de la méthode de prédiction sont testées également, avec l'utilisation du logarithme du nombre de bulls afin d'éviter la prédiction de valeurs négatives, ou encore, l'essai de différents rythmes de dépouillement des nuits afin de trouver un compromis entre gain de temps et précision du modèle. Cette étude montre l'utilité de ce type de suivi dans la conservation des aloses feintes et la mise en place de mesures de gestion de ces populations migratrices.	

Abstract (1600 caractères maximum) :

The twaite shad (*Alosa fallax*), an anadromous migratory species, is present in the Charente River. It develops at sea and reproduces in freshwater from April to June. In order to monitor the population, the EPTB Charente has implemented an acoustic monitoring program on the Taillebourg spawning ground, based on the detection of “bulls”, the characteristic sound of the reproductive act. The objective is to estimate the number of spawners using a Partial Least Squares (PLS) regression method. Over 39 monitored nights, 2,863 bulls were recorded, then extrapolated and calibrated to estimate a total of 21,107 bulls, corresponding to 4,221 spawners. Implemented since 2010, the monitoring program has revealed a decrease in the number of spawners over time. However, a slight upward trend has been observed since 2023, stabilizing into a plateau in 2024–2025. The analysis of environmental variables shows that water temperature and seasonal timing are key factors in predicting the number of bulls. The study of the 2014–2025 period reveals a shift of reproductive activity to earlier dates, seemingly influenced by rising water temperatures, suggesting an impact of climate change on shad reproductive behaviour. Improvements to the prediction method were also tested, including the use of logarithmic transformation of bull numbers to avoid negative values, as well as trials of different monitoring frequencies to balance efficiency and accuracy. This study demonstrates the value of acoustic monitoring for the conservation of twaite shad and the development of management measures for these migratory populations.

Mots-clés : Aloses feintes, reproduction, Charente, bull, PLS

Key Words: Twaite shad, spawning, Charente River, bull, PLS

** Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires*

Document à déposer sur moodle en format .txt