

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Evolution interannuelles de densités de silure en étiage dans la Loire



**Evolution interannuelles de densités de
silure en étiage dans la Loire :
Détermination d'un protocole permettant
d'établir des liens entre densité de population
et variables environnementales**

Catherine Boisneau

Alan Fritsch

2023-2024

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Ces remerciements seront brefs, je remercie tout mes camarades pour leur soutien indéfectible, mes colocataires imprévus sur ces derniers jours de rédaction et Catherine Boisneau pour son aide, ses conseils et sa supervision de ce projet de fin d'études !

LEXIQUE

Actinoptérygiens : Poissons à nageoires rayonnées

Anadrome : Poisson migrateur dont la reproduction est en eau douce et la croissance est en mer

Étiage : Période de très faible débit dans les cours d'eau

Fréquence de dépassement : fréquence d'apparition d'une certaine valeur dans un jeu de donnée

Poïkilotherme : Animal dont la température corporelle dépend du milieu

Réseau hydrographique : Ensembles des milieux aquatiques d'eau douce

Thermophile : affectionnant les milieux chauds

VCN30 : Plus faible débit moyen sur une 30 jours consécutifs enregistré sur une année

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
I- ANALYSE DE LA DENSITE DE POPULATION EN FONCTION DE L'INTENSITE ET LA DUREE D'ETIAGE	9
INTRODUCTION.....	9
MATERIEL ET METHODES	9
1) <i>Site d'étude</i>	9
2) <i>Méthode de prospection</i>	10
3) <i>Provenance des données</i>	10
4) <i>Traitement des données</i>	10
RESULTATS	11
DISCUSSION	13
II- ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ÉCOLOGIE DU SILURE	14
INTRODUCTION.....	14
METHODE	14
1) <i>Recherche d'articles</i>	14
2) <i>Choix des variables environnementales</i>	15
3) <i>Détermination de la pertinence des critères</i>	15
RESULTATS	15
1) <i>Température</i>	16
2) <i>Structuration des habitats</i>	16
3) <i>Hauteur d'eau</i>	17
4) <i>Luminosité</i>	17
5) <i>Type de végétation</i>	17
6) <i>Turbidité</i>	17
7) <i>Substrat minéral</i>	18
8) <i>Vitesse de courant</i>	18
9) <i>Oxygène dissous</i>	18
10) <i>Salinité</i>	19
11) <i>Proies potentielles</i>	19
12) <i>Pollution</i>	19
DISCUSSION	19
III- ÉLABORATION D'UN PROTOCOLE DE MESURE DES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES.....	21
INTRODUCTION.....	21
MATERIEL ET METHODES	21
1) <i>Choix des variables</i>	21
2) <i>Mesure des différents paramètres</i>	21
RESULTAT	22
1) <i>Prise de données bathymétriques</i>	22
2) <i>Mise en place de bouées pour les données continues</i>	22
3) <i>Prospection de terrain pour déterminer les habitats</i>	23
DISCUSSION	24
BIBLIOGRAPHIE.....	25
ANNEXES	27
1) <i>Calcul du VCN30</i>	27
2) <i>Calcul de la durée d'étiage</i>	27
3) <i>Tableau récapitulatif de la bibliographie</i>	28

Introduction

La gestion des espèces invasives est aujourd'hui un des enjeux majeurs de la protection des écosystèmes. La mondialisation et les usages anthropiques ont permis l'abolition de nombreuses barrières géographiques et le contexte actuel de réchauffement climatique déplace progressivement certaines barrières physiologiques, permettant ainsi à de nombreuses espèces introduites de proliférer de manière incontrôlée. Ces espèces sont qualifiées d'espèces exotiques envahissantes dès lors qu'elles sont considérées comme une menace pour les écosystèmes et font alors l'objet d'une régulation. Cependant cette perturbation des écosystèmes est difficile à quantifier et la gestion peut devenir particulièrement délicate lorsque l'espèce introduite apporte des bénéfices aux usagers humains. En France, le silure glane (*Silurus glanis*) en est l'exemple parfait, faisant actuellement controverse quant à son statut d'espèce exotique envahissante (Vagnon, 2021).

Introduit sur le territoire dans les années 1970, sa grande adaptabilité physiologique et comportementale lui a permis de coloniser presque l'intégralité du réseau hydrographique français (Vagnon, 2021). Par sa grande taille (les plus grands dépassant les 2m80, excédant ainsi le double des prédateurs natifs), cette espèce a un fort potentiel récréatif pour les pêcheurs (Cucherousset et al., 2018) et est dépourvu de prédateur une fois adulte tout en ayant accès à de nombreuses proies ayant atteint une taille autrefois considérée refuge. Ainsi, par sa haute position trophique, le Silure exerce une pression de prédation, créant ainsi un effet Top-down sur les écosystèmes dans lesquels il est introduit (Copp et al., 2009). Bien que l'étude de 2015 de Guillerault et al. n'ait pas noté de perturbation majeure sur la faune piscicole à l'échelle de la France, elle émet des réserves quant à l'impact des silures de grande taille sur les poissons migrateurs anadromes. D'autres études (Syvaranta et al., 2009 ; Boisneau et Belhamiti, 2018 ; Boisneau et al., 2023) soulignent les effets de cette prédation sur les espèces migratrices, dont certaines espèces protégées et sur la liste rouge de l'UICN (*Alosa alosa*, *Alosa fallax*, *Salmo salar*, *Petromyzon marinus* et *Lampetra fluviatilis*). Ces caractéristiques font du silure glane une espèce sur laquelle les avis divergent, appréciée pour ses qualités récréatives mais dont l'omniprésence nuit à certaines espèces au statut d'ores-et-déjà fragile.

Malgré l'intérêt qu'il suscite, les études sur la densité de répartition du silure sont assez rares hors de son aire de répartition native (Copp et al., 2009). Étant une espèce facilement identifiable et fortement sédentaire (Danek et al., 2021), il est relativement facile d'établir des protocoles de comptage subaquatiques en journée, lorsqu'ils se reposent généralement dans un abri fixe (Copp et al., 2019). Des prospections ont donc été réalisées sur un linéaire d'environ 15 km entre Montlouis-sur-Loire et Chaumont-sur-Loire à partir de 2016 (à l'exception de l'année 2018) afin d'estimer la densité des populations sur un tronçon de la Loire. L'écologie du silure étant encore assez peu comprise, ce projet s'inscrit dans la continuité de ce projet et a pour but l'élaboration d'un protocole permettant de mieux comprendre la répartition des densités de silure à l'aide de variables environnementales.

Cette étude comporte une analyse de l'évolution interannuelle de la densité de Silure dans la Loire en fonction des caractéristiques d'étiage, la détermination de variables environnementales pertinentes dans l'écologie du silure glane et l'élaboration d'un protocole permettant de relier la densité de population aux variables environnementales choisies.

I- Analyse de la densité de population en fonction de l'intensité et la durée d'étiage

Introduction

L'hydrologie joue un rôle majeur dans la structure et dans la temporalité des changements au sein des écosystèmes d'eau douce. Il détermine la morphologie, influence la physico-chimie du cours d'eau et ainsi conditionne les habitats disponibles (Kędzior et al., 2022). Lors des périodes d'étiage, la diminution du niveau de l'eau diminue drastiquement les habitats en déconnectant les berges du cours d'eau, induisant une plus forte concentration d'individus dans les habitats restants (Tennant, 1976). Cependant, qualifier un étiage n'est pas simple à cause des multiples définitions qui coexistent basées sur différents critères : l'analyse des débits classés et l'analyse des débits annuels à partir d'une valeur seuil ou d'une durée fixée (Lang Delus, 2011).

La zone d'étude de densité du silure glane dans la Loire est située à proximité d'une station hydrométrique, cette première section a pour but d'analyser la densité surfacique interannuelle obtenue par rapport aux caractéristiques d'étiage.

Matériel et méthodes

1) Site d'étude

L'étude prends place sur les chenaux principaux de la partie médiane de la Loire en amont de Tours, la limite aval se situant à île de Montjoie à Lussault-sur-Loire et la limite amont se terminant juste en aval du pont de Chaumont-sur-Loire.

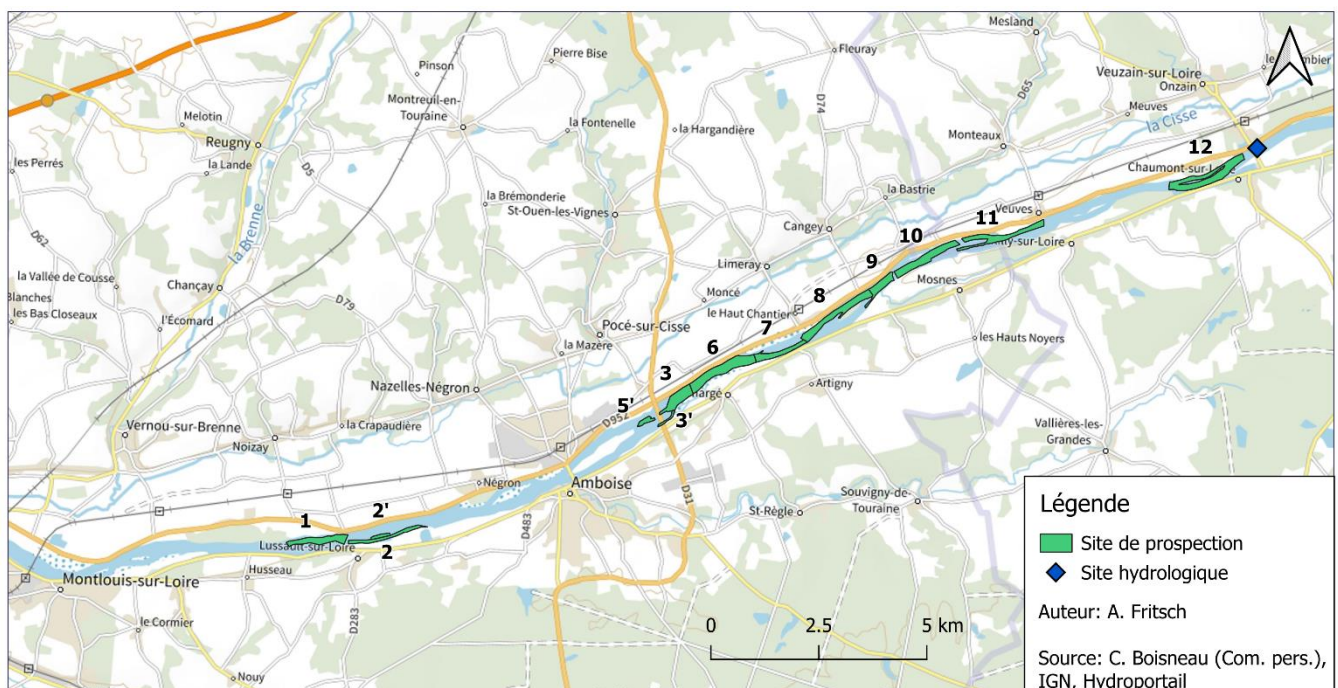


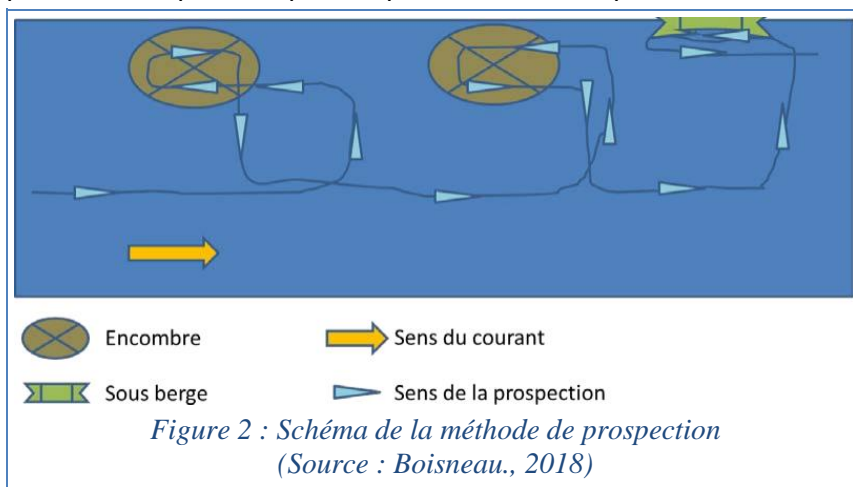
Figure 1 : Sites de prospection de l'étude de densité du silure glane

Ce secteur ne contient aucun obstacle à la migration et possède un faciès typique de la partie médiane de la Loire (Boisneau, 2018). En amont immédiat de la zone d'étude se trouve le site hydrologique de la Loire à Onzain (référence : K480 0010) qui inclut une station hydrométrique et une station de qualité physico-chimique.

La longueur totale du segment avoisine les 25 km, cependant seul 16 kilomètres ont été prospecté, réparti en 13 sites représenté dans la *fig.1*.

2) Méthode de prospection

La méthode de prospection est détaillée dans l'étude de Boisneau en 2018. Les comptages subaquatiques s'effectuent de jour, dans des conditions climatiques et hydrologique stables et avec une transparence minimale de l'eau de 2m. Dans un premier temps, une prise de vue en drone va permettre la prise de photos par transects ou quadrat et la détection d'individus. Une observation



subaquatique par binômes vient compléter ces données, confirmant en cas de doute et permettant la prospection des zones abritées et inaccessibles au drone. Les plongeurs progressent dans le sens du courant et prospectent en remontant celui-ci.

3) Provenance des données

Les données des prospections ont été transmises par Catherine Boisneau. Elles contiennent :

- Les données brutes de terrain
- Les densités surfaciques et linéaires pour chaque station, calculées par P. Canu en 2023 dans le cadre de la première partie de ce Projet de Fin d'Étude et vérifiées par C. Boisneau
- Des photos aériennes délimitant chaque station

Les données hydrologiques étudiées ont été obtenues à partir des données Hydroportail de la station hydrométrique K480 0010 01 (décrite dans la partie 1) à la date du 19/01/2024. Le débit moyen journalier sur la période du 01/01/16 au 31/12/2023 a été relevé, contenant les données validées et pré-validées. À la date du téléchargement des données, les données des 2 dernières semaines de décembre 2023 n'ont pas été validées de manière définitive, mais ces données semblent présenter des débits trop importants pour être pertinentes pour cette étude.

4) Traitement des données

Les données de prospection ont été spatialisées à l'aide de QGIS 3.30.2 à partir de photos aériennes transmises et des données d'orthophotographies de l'IGN.

L'impact des altérations hydrologiques dépend de plusieurs facteurs : leur intensité, leur durée, leur fréquence et leur temporalité (Richter *et al.*, 1996). Pour caractériser l'impact des étiages, seul l'intensité et la durée de l'évènement sera prise en compte, la fréquence des étiages étant supposée annuelle et la temporalité étant négligée. L'intensité d'étiage sera représentée par le VCN30 et la durée de l'étiage sera calculée comme le nombre de jours consécutifs maximum annuel en dessous d'une valeur seuil. Le Q90 (soit le débit avec une fréquence de dépassement de 90% dans les débits classés) est utilisé, ce débit caractéristique d'étiage étant fréquemment utilisé comme débit seuil pour catégoriser les étiages (Lang Delus, 2011). Le VCN30 et la durée d'étiage ont été calculés à l'aide d'Excel (*Calculs en annexe*) et le VCN30 a ensuite été vérifié à l'aide de la section « Statistiques » d'Hydroportail.

Plusieurs segments (1, 2, 2' et 5') ont été exclus de l'étude statistique car ils ne présentaient des données que sur les années 2016 et 2017 et ne sont ainsi pas représentatif de l'évolution sur toute la durée de l'étude. De plus, la distance assez élevée entre le segment 2 et 3 diminue la pertinence de l'analyse spatiale à cause de l'absence donnée sur un linéaire de plus de 6 km entre les 2 stations.

Résultats

La carte de densité surfacique (*fig.3*) révèle certaines disparités dans les différents segments. Principalement, les sites 3', 3 et 7 présentent de fortes densités sur toutes les années représentées à l'exception de l'année 2023. Les segments 8, 9, 10 et 11 ont vu leur densité chuter à partir de 2019, à l'exception de l'année 2022 pour les segments 8 et 10.

Sur la zone d'étude, des valeurs élevées sont notables sur l'année 2016 et 2017, et plus particulièrement 2017. Elles ont cependant drastiquement diminué de 2017 à 2019, l'absence de données sur l'année 2018 ne renseigne pas la temporalité de cette diminution. Les densités sont ensuite revenues à des valeurs plus élevées sur les années suivantes, suivi d'une nette baisse sur l'année 2023 par rapport à l'année 2022 sur l'ensemble des segments prospectés.

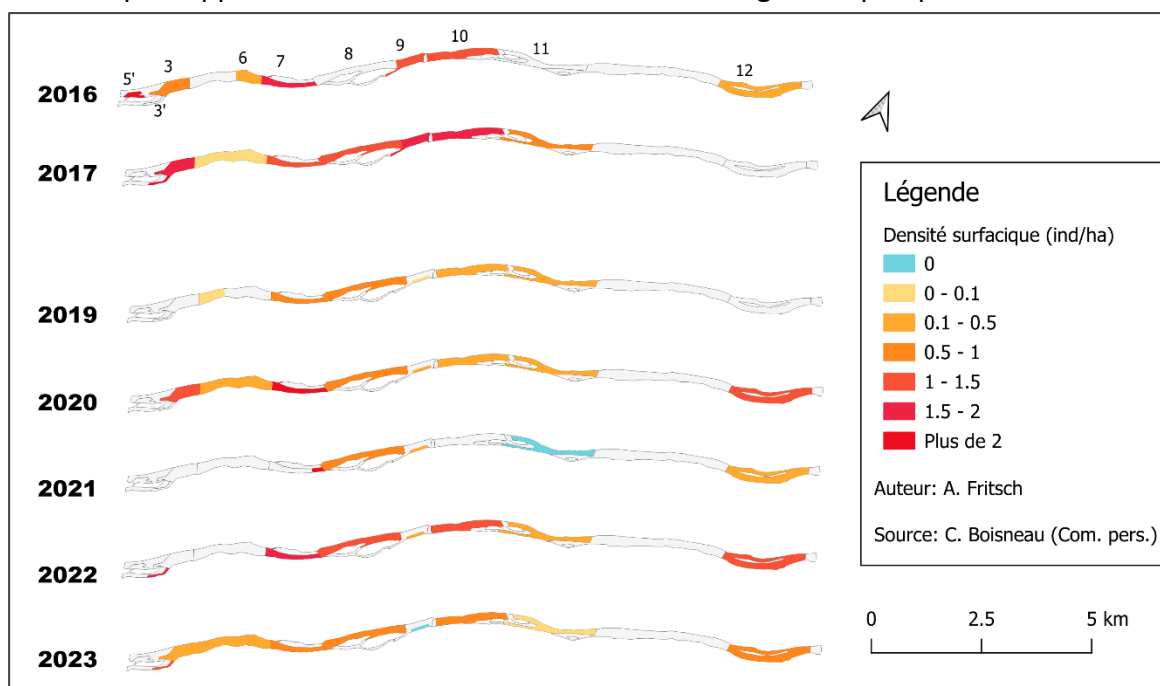


Figure 3 : Densité surfacique interannuelle du silure des sites de prospection 3 à 12

Les caractéristiques d'étiages choisies pour l'intensité d'étiage et la durée de l'étiage semblent varier inversement l'une par rapport à l'autre. Le VCN30 diminue progressivement et atteint sa valeur minimale en 2019, et remonte jusqu'à atteindre son maximum en 2021, avant de redescendre sur les années 2022 et 2023. A l'inverse, la durée d'étiage déterminée à l'aide du Q90 augmente progressivement jusqu'à 2018 et triple lors de l'année 2019. Il redescend en 2020 jusqu'à être nul en 2021, avant de fortement remonter sur les 2 dernières années.

En les comparant aux données de densité moyenne des segments 3 à 12 (fig. 4), on observe une forte augmentation de la densité surfacique de 2016 à 2017, atteignant 3,65 individus par hectare. L'année de plus faible densité, 2019, correspond à l'année avec les caractéristiques d'étiages les plus élevées. L'évolution des densités suit celle de l'intensité de 2019 à 2023, sauf pour l'année 2022 dont les densités sont plus élevées que les autres années malgré des caractéristiques d'étiage plus sévère que 2021 dont les conditions hydrologiques apparaissent comme plus favorables que les autres années de l'étude.

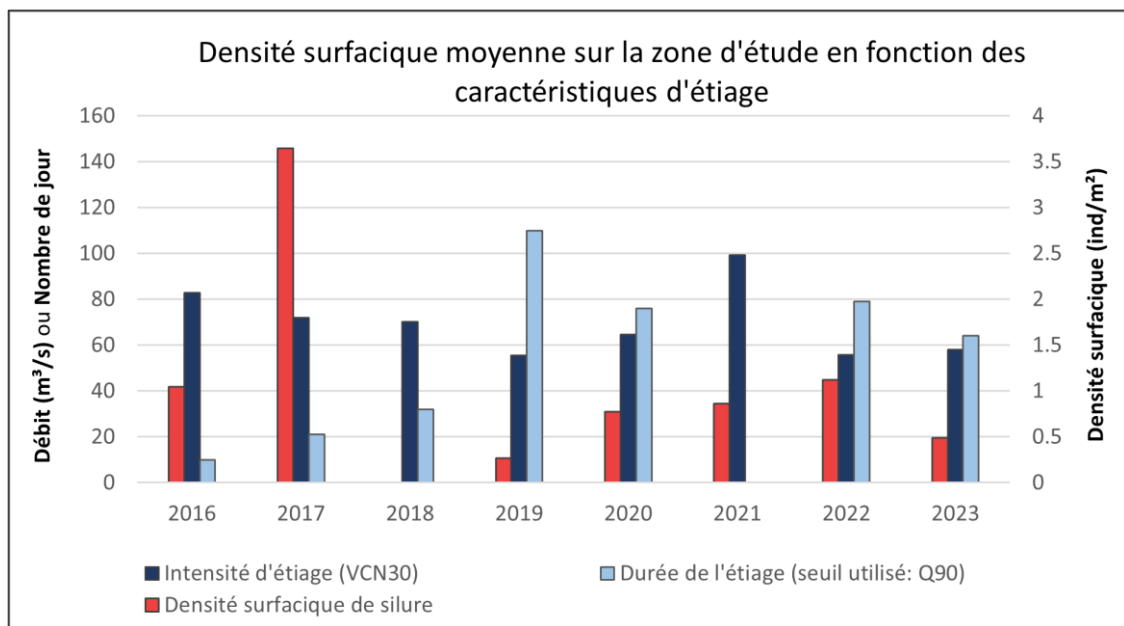


Figure 4 : Densité surfacique en fonction des caractéristiques d'étiage sur les segments utilisés pour l'analyse statistique

Ces tendances sont particulièrement visibles sur le segment 7 (fig.5), où la densité semble varier de manière contraire à la durée d'étiage. Elles sont cependant moins voire peu visibles sur les autres segments de l'étude, parfois à cause de l'absence des données sur certaines années.

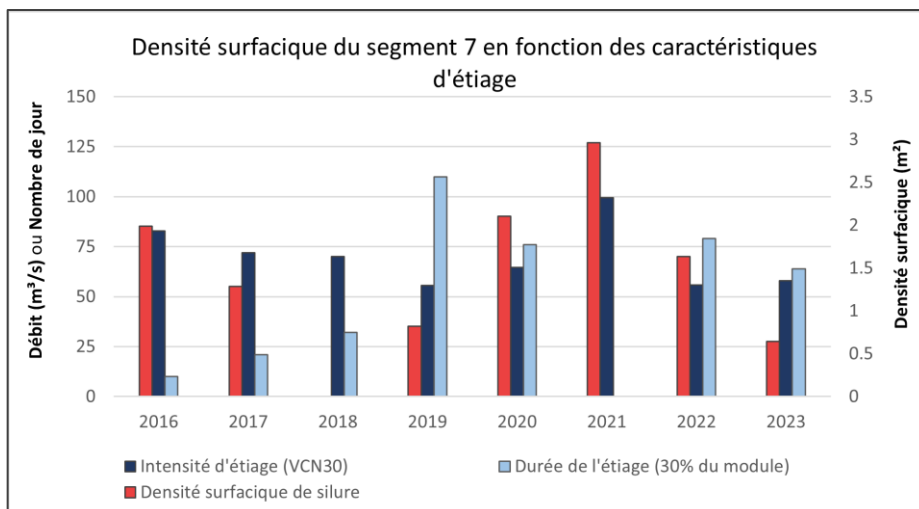


Figure 5 : Densité surfacique en fonction des caractéristiques d'étiage sur le segment 7

Discussion

La relation entre VCN30 et durée d'étiage était attendue. Le VCN30 représentant le mois au débit le plus faible, une faible valeur indique un fort étiage et est plus susceptible d'être atteint les années où l'étiage est le plus long. Selon les critères choisis, l'étiage de 2019 est particulièrement sévère tandis que l'année 2021 en est dépourvu selon la définition choisie à partir du Q90.

Des liens entre l'hydrologie et la densité d'individus peuvent être interprétés à l'échelle de la zone d'étude mais l'analyse à une échelle spatiale plus fine relève principalement de la supposition. Les segments pour lesquels cette relation semble plus marquée possèdent peut-être des habitats intéressants mais sensibles aux étiages, comme des sous-berges ou des chevelus racinaires qui se retrouvent fréquemment exondés à faible débit. À l'inverse, les sections qui présentent principalement des fosses seraient peu affectés voir susceptibles d'accueillir plus d'individus si les habitats en berges venaient à être indisponibles.

Au-delà d'une possible mortalité dû à la diminution des ressources lors de l'étiage, il est possible que de forts étiages comme celui de 2019 aient contraint les silures à se déplacer vers d'autres tronçons ou segment à cause d'une faible disponibilité des habitats. Certains habitats. Le retour progressif pourrait être témoin d'un progressif retour des silures dans la zone d'étude, limité par les étiages des années 2022 et 2023. Il y a cependant beaucoup d'autres paramètres qui influent sur la répartition du silure et certaines études contestent les relations entre l'hydrologie et les mouvements du Silure (*Trancart et al., 2023*).

Plusieurs limites lors de l'étude des densités sont notables. Le postulat de l'immobilité des silures lors de l'étude est difficilement vérifiable en pratique et se repose sur le caractère fortement sédentaire qui est souvent observé chez cette espèce (*Danek et al., 2014 ; Cucherousset et al., 2018*). Malgré tout, le caractère imprévisible et exploratoire de certains individus qui se déplacent sur de longue distance est parfois observé (*Trancart et al., 2023*). L'éventuelle absence de données sur certains tronçons à certaines années, parfois dû à des conditions de prospections défavorables (*Boisneau, com. pers., 2023*), limitent parfois les analyses comme mentionné ci-dessus.

La caractérisation de l'étiage est assez simpliste et peut également être soumise à plusieurs critiques. La temporalité est négligée malgré son importance selon *Richter et al. (1996)* et aurait pu possiblement être impactante selon la date de la prospection. Également, le choix du Q90 pour déterminer la durée des étiages est arbitraire et se base sur des chroniques de débits historique pour la station choisie et ne tient pas véritablement compte de la possible évolution de l'hydrologie dans un contexte de dérèglement climatique.

II- Étude bibliographique sur l'écologie du Silure

Introduction

L'écologie du silure glane étant un sujet complexe par la grande adaptabilité de l'espèce, l'étude de variables environnementales favorisant ou limitant se heurte à plusieurs problèmes. L'espèce présente avant tout une forte tolérance à de nombreuses perturbations du milieu. Le silure étant notamment introduit pour son intérêt économique, la plupart des études avant l'année 2000 se basent sur des données obtenues en aquaculture et non pas d'études *in situ*, aboutissant parfois à des sur ou sous-estimation des traits écologiques de l'espèce. Également, la forte sédentarité du silure pousse certains individus à supporter certaines conditions défavorables (Danek et al., 2014).

Dans son cycle journalier, le silure se repose dans un site qui présente des conditions favorables de manière à dépenser le moins d'énergie possible (Cucherousset et al., 2018). Ainsi, les variables environnementales relatives à l'habitat seront généralement mises en relation avec le lieu de repos de l'individu. Les paramètres physico-chimiques seront étudiés à l'échelle du segment du cours d'eau.

Cette section a pour but la détermination de variables environnementales pertinentes pour expliquer la densité de silure à l'échelle d'un segment de la partie médiane de la Loire.

Méthode

1) Recherche d'articles

La recherche d'article a été effectuée en octobre 2023 sur un ordinateur personnel, potentiellement influencé par des recherches préliminaires sur le sujet. Les moteurs de recherches utilisés sont respectivement *EDP Science*, *Google Scholar*, *HAL*, *ResearchGate*, *ScienceDirect* et *Springer*. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des recherches et des articles trouvés est disponible en annexe.

Dans un premier temps, une recherche en utilisant les moteurs de recherche énoncés ci-dessus et les mots clés « *Silurus glanis* France » a permis de recueillir 46 articles. Les articles n'ayant pas comme sujet principal le Silure glane et son étude furent écartés et ne furent pas comptés dans la population statistique. Parmi les articles retenus, 38 furent écartés car ils n'étaient pas pertinents dans l'étude des variables environnementales *in situ* ou simplement indisponibles. Ainsi, 9 articles restants furent ainsi utilisés pour cette étude bibliographique.

Dans un second temps, des articles susceptibles de traiter de l'écologie du Silure furent récoltés à l'aide de la bibliographie d'autres articles (qui ne sont pas forcément conservés dans l'étude). Ces articles sont au nombre de 6.

Une recherche complémentaire recherchant « *Silurus glanis* » associé aux variables environnementales choisies dans la partie B traduites en anglais fut également tentée. Cependant, tous les articles obtenus étaient d'ores-et-déjà obtenus à l'aide des 2 méthodes précédentes.

Finalement, l'étude GLANISPOMI a été transmise en communication personnelle par Catherine Boisneau.

2) Choix des variables environnementales

Le choix des variables environnementales doit être pertinent selon l'échelle de la zone d'étude afin de pouvoir comparer les différentes unités spatiales la composant. Dans le cas de cette étude, l'échelle du mésohabitat a été choisie. Le mésohabitat est une approximation de l'habitat fonctionnel d'une espèce (*Kemp et al.*, 1999), soit ici l'échelle du segment, un silure se déplaçant rarement de plus de quelques kilomètres (*Trancart et al.*, 2023).

Historiquement, les variables hydrauliques **vitesse de courant**, **hauteur d'eau** et **substrat** définissent les faciès des cours d'eau et sont utilisées pour qualifier les habitats piscicoles. On peut ajouter à cela la présence d'abris et de sous-berges regroupés sous le nom **structuration des habitats**, ainsi que la **luminosité** qui peut parfois servir de proxy à cette variable. À cela s'ajoutent les paramètres physico-chimiques mesurables simplement à l'aide d'une sonde, la **température**, l'**oxygène dissous** et la **salinité**. Les interactions avec la biocénose peuvent également être important dans la détermination de l'habitat fonctionnel d'une espèce. Le silure n'ayant pas de prédateurs à l'âge adulte, seul les variables **proies disponibles** et **végétation présente** ont été retenus. Finalement, la **pollution** et la **turbidité**, fréquemment mentionnés dans l'écologie du silure, furent ajoutées.

3) Détermination de la pertinence des critères

Le classement des variables selon leur pertinence a été déterminé à partir de 4 critères :

- La **cohérence avec l'écologie du silure** telle que décrite dans la littérature
- La **pertinence** de la mesure de l'indice à l'échelle spatiale et saison étudiée
- La **facilité de mise en place** et fiabilité de la mesure

Bien que les deux premiers critères soient déterminants dans l'évaluation de la pertinence, l'applicabilité d'un indice lié à cette variable sera discutée et des solutions seront proposées.

Résultats

Paramètres pertinents	Température + Facile à mettre en place + Espèce thermophile - Relative tolérance au froid	Hauteur d'eau + Quantifiable + Pertinent à la saison étudiée - Long à mettre en place	Structuration des habitats + Critère majeur de répartition du silure - Très difficile à mesurer	Luminosité + Approxime structuration + Généralement nocturne - Difficulté de mise en place
	Paramètres potentiels	Type de végétation + Peut approximer abri + substrat de ponte - Ne semble pas déterminant à la saison étudiée (étiage)	Turbidité + Facilement quantifiable - Condition défavorable à la prospection de terrain	Substrat + Facilement qualifiable - Ne semble pas déterminant
Paramètres à écarter		Oxygène dissous + Facile à mettre en place - Paramètre rarement limitant en milieu lotique - Forte tolérance du silure	Salinité + Facile à mettre en place - Tolérance comparée aux valeurs présentes en cours d'eau	Proies potentielles - Chasseur opportuniste et adaptable

Figure 6 : Tableau récapitulatif de l'étude bibliographique

Les variables ont ainsi été listées, analysées et triées selon leur pertinence. La *fig.6* fait la synthèse des résultats en les regroupant en 3 catégories :

- Les paramètres pertinents qui sont à prendre en compte dans l'étude
- Les paramètres potentiels qui peuvent être intéressants pour l'étude
- Les paramètres à écarter qui ne sont pas intéressants pour l'étude

Un code couleur supplémentaire permet de classer les paramètres au sein d'une catégorie, allant de bleu pour les variables les plus pertinentes à rouge pour les variables incohérentes.

1) Température

La température est un facteur déterminant de la répartition géographique des animaux poïkilothermes. Chez les actinoptérygiens, certaines fonctions vitales telles que l'alimentation et la reproduction ne sont assurés que lorsque la température est comprise dans un intervalle particulier.

Le silure est une espèce très tolérante concernant ce paramètre, supportant des gammes de températures comprises entre 3 et 30°C (*Schlumberger et al., 2001*) même s'il démontre des signes de stress en dessous de 12°C (*Souchon et Tissot, 2012*). Il présente toutefois des tendances fortement thermophiles (*Schlumberger et al., 2001 ; Copp et al., 2009*) qui impacte leur répartition dans l'espace, certains individus se déplaçant préférentiellement dans les zones artificiellement réchauffées des rivières (*Cucherousset et al., 2021*).

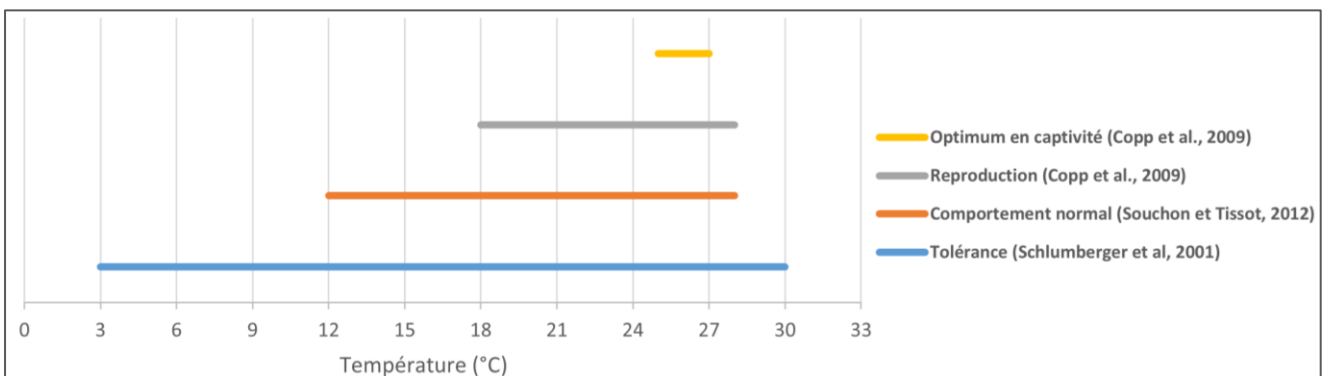


Figure 7 : Fonction écologiques du silure en fonction de la température

Ce paramètre est très facilement applicable à l'aide d'une sonde thermomètre ou même des sondes physico-chimiques qui généralement sont capables de mesurer la température. La mesure doit cependant se faire selon un protocole précis afin d'éviter les biais liés aux variations journalières, saisonnières et à la position dans la colonne d'eau.

2) Structuration des habitats

En dehors de variations comportementales particulières, le silure s'abrite en journée, affectionnant particulièrement les milieux à la structuration complexe (*Proteau et al., 2008 in Vagnon, 2021*). Ces milieux lui offrent divers abris, les individus au repos étant généralement observés dans des crevasses au fond du lit, dans les sous-berges ou couvert sous des structure végétales comme des racines ou des souches (*Schlumberger et al., 2001*). Cependant, Les sous-berges et couverts végétaux près des berges sont souvent exondés en étiage, favorisant fortement la présence des individus au sein des fosses (*Boisneau et al., 2023*).

Bien qu'étant un des facteurs majeurs expliquant la répartition des silures, il est très difficile à quantifier ou évaluer. Le volume de sous-berges peut potentiellement être calculé mais lorsque la structuration de l'abri est complexe, seule une estimation de l'opérateur permet d'obtenir un résultat rapidement au détriment de la précision de la mesure.

3) Hauteur d'eau

Les grands cours d'eau profonds et lenticques sont souvent considérés comme l'habitat préférentiel du silure (*Copp et al., 2009 ; Valadou, 2007*), notamment à cause de sa propension à se reposer dans les zones profondes des masses d'eau qu'il occupe (*Schlumberger et al., 2001 ; Cucherousset et al., 2018*). Comme décrit dans la partie précédente, les étiages favoriseraient l'utilisation des fosses comme aire de repos (*Boisneau et al., 2023*).

La hauteur d'eau est une variable quantifiable par bathymétrie, ce qui permet d'obtenir la forme du lit, délimiter les fosses et ainsi déterminer les habitats disponibles.

4) Luminosité

Ses sens de l'ouïe et de l'odorat étant particulièrement développés par rapport à sa vue (*Copp et al., 2009*), le silure est particulièrement adapté aux milieux dépourvus de lumière. Son activité prenant place principalement au crépuscule ou la nuit (*Boujard, 1995*), ils s'abritent en journée (*Valadou, 2007*) dans des milieux couverts comme décrit dans la partie traitant de la structuration des habitats.

La luminosité est à la fois quantifiable et peut faire office de proxy pour le couvert. La difficulté de la mesure réside dans la variabilité spatiale et temporelle de la lumière. L'intensité lumineuse varie fortement selon la profondeur en fonction de turbidité, la position dans le lit mineur (influence de la ripisylve près des berges), de l'heure de mesure ou simplement de la météo.

5) Type de végétation

La végétation présente une certaine importance dans l'écologie du silure. Les zones d'herbiers servent notamment de substrat de ponte (*Copp et al., 2009*) mais aussi de zone de repos, sa présence étant fréquente dans les zones d'herbiers (*Valadou, 2007 ; C. Boisneau, com. Pers., 2023*). La ripisylve revêt également une grande importance dans la création d'habitats favorables à la présence du silure comme les racines immergées et le bois mort.

Bien qu'important dans l'écologie du silure, ce caractère n'est jamais mentionné comme un facteur déterminant de sa distribution, l'espèce s'accoutumant à différentes végétations (herbiers, ripisylve) et même à son absence (présence dans les fosses). Ce facteur reste néanmoins intéressant pour l'étude du milieu et de nombreuses méthodologies sont documentées et simple à mettre en place.

6) Turbidité

De manière similaire à la luminosité, le silure a des sens adaptés aux milieux turbides (*Copp et al., 2009*). Bien que tolérant tout type de milieu, il est généralement associé aux sections eutrophes et turbides des cours d'eau (*Schlumberger et al., 2001 ; Valadou, 2007 ; Copp et al., 2009 ; Vagnon,*

2021). Ces milieux pourraient être favorables par la diminution de la compétition interspécifique avec d'autres prédateurs préférant les eaux claires comme le brochet (*Schlumberger, 2001*).

La mesure de la turbidité est relativement facile à mettre en place à l'aide d'une sonde spécifique. Cette variable environnementale rentre cependant en contradiction avec les conditions de prospection par rapport à la précision de la mesure, qui demande une vision claire (2 mètres minimum).

7) Substrat minéral

Le substrat ou la granulométrie est rarement mentionné directement dans la littérature, mais le silure est plutôt associé aux secteurs aval de la zone à brème des cours d'eau (*Volter et Bischoff, 2001 in Valadou, 2007*) dont la granulométrie est plutôt fine. En lac, il est associé aux fonds vaseux (*Lelek, 1987 in Copp et al., 2009*), renforçant cette observation. L'absence d'informations supplémentaires ne permet pas d'attester une relation certaine entre la présence du silure et la granulométrie du substrat.

8) Vitesse de courant

Le silure est souvent associé à des cours d'eau lenticules ou de faible courant (*Greenhalgh, 1999 in Copp et al., 2009 ; Valadou, 2007*) cependant on le retrouve également dans des milieux faiblement lotiques (*Vagnon, 2021*). Ces caractéristiques sont cependant décrites à l'échelle d'un secteur de cours d'eau mais ne reflètent pas l'habitat immédiat de l'individu. De plus, la plupart des habitats dans lequel le silure se repose sont à l'abri du courant (végétation, sous-berges, fosses). Il est donc difficile d'exploiter le paramètre de vitesse en tant que variable environnementale.

9) Oxygène dissous

Les événements d'hypoxie peuvent être fortement limitant pour déterminer téléostéens d'eau douce. Le silure est particulièrement résistant à de faible teneur en oxygène dissous, ayant une tolérance long-terme à un seuil de 2.4 mg/L (*Daněk et al., 2014*) qui peut aller jusqu'à 1.5mg/L pour une durée de 24h, démontrant une capacité de survie supérieure dans des conditions hypoxiques à d'autres espèces tolérantes comme l'anguille européenne ou la carpe commune (*Daněk et al., 2014 ; Westrelin et al., 2022*). Cette résistance est due à son haut taux d'hémoglobine dans le sang (*Mihálik, 1995 in Copp, 2009*), sa faible pression artérielle et une capacité à augmenter sa ventilation (*Massabuau et Forgue, 1995*).

Les valeurs seuils de l'espèce sont très basses et sont bien en dessous des valeurs généralement trouvées en cours d'eau. Dans le cas de cette étude, le seuil de tolérance long terme est loin d'être atteint à la station physico-chimique en amont de la zone d'étude (*fig.8*). L'étude de *Daněk et al.* en 2014 avait également observé que même en cas de stress hypoxique, certains individus refusaient de quitter leur aire de repos.

Malgré la facilité de mise en place, cette variable environnementale n'est pas à prendre en compte dans le contexte d'un cours d'eau.

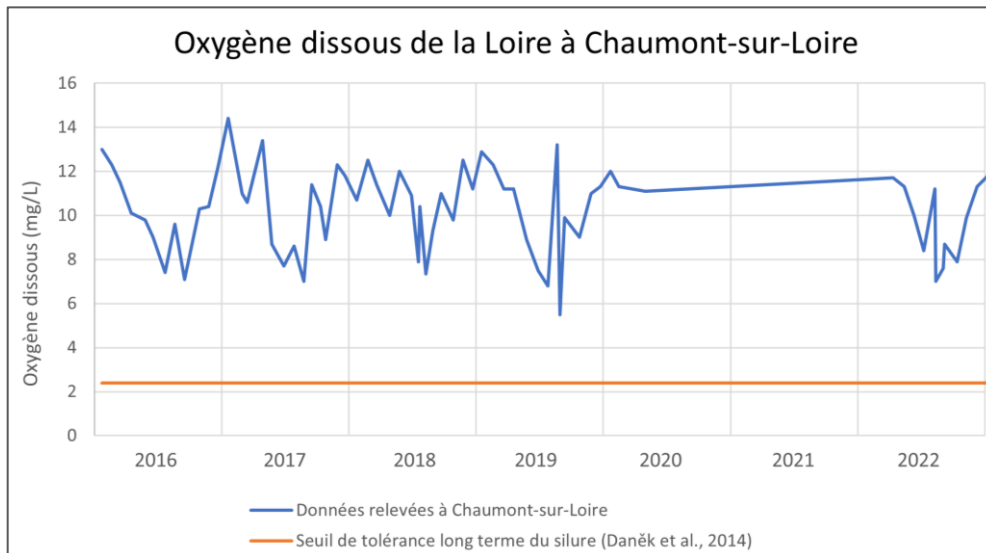


Figure 8 : Comparaison des données relevées en amont de la zone d'étude avec le seuil de tolérance long-terme du Silure

10) Salinité

Supporte de faibles teneurs de salinité (jusqu'à 15 g/L), on retrouve occasionnellement des silures en milieu estuariers voir côtiers dans de rares cas (Copp et al., 2009 ; Valadou, 2007).

L'étude se passant en milieu dulcicole, ce paramètre n'est pas à prendre en compte car ces valeurs de salinité ne sont jamais atteintes.

11) Proies potentielles

Le large spectre alimentaire et le caractère opportuniste du silure fait consensus dans la littérature (Schlumberger, 2001 ; Copp et al., 2009 ; Vejrik et al., 2019 ; Valadou, 2007). Ce caractère est dû à grande plasticité comportementale qui a permis le développement de différentes stratégies de chasse selon le milieu, la saison, les proies disponibles (Copp et al., 2009) et la compétitivité interspécifique (Lockwood et al., 2013 in Vagnon, 2021). Ce paramètre n'est donc pas pertinent dans l'étude de la répartition du silure dans un cours d'eau.

12) Pollution

Bien que fréquemment mentionné dans l'écologie du Silure, la pollution ne peut pas être considérée comme une variable car l'objet de cette pollution n'est pas spécifié et est trop vague pour être mesurée avec précision. Elle n'est pas non plus pertinente car le silure est décrit comme résistant à la pollution (Vagnon, 2021) grâce à sa taille et à son haut taux d'hémoglobine dans le sang (Lelek, 1987 in Copp, 2009).

Discussion

Les paramètres température et hauteur d'eau apparaissent comme des variables indispensables dans l'explication de l'abondance du silure à l'échelle du mésohabitat par leur pertinence et leur mise en place directe et relativement simple. La Structuration des habitats et la luminosité semblent importantes à prendre en compte, mais l'applicabilité de la mesure est plus

incertaine et est soumis à plus de limites. Le type de végétation et la turbidité restent des paramètres intéressants et pourraient être inclus selon le protocole et l'avis de son auteur.

Comme mentionné dans l'introduction, la plasticité comportementale et l'adaptabilité du silure complexifie l'affirmation de caractéristiques précises en dehors des besoins purement physiologiques d'un individu.

Une critique qui pourrait être adressée à cette section serait la méthode de recherche et de sélection d'articles. La phase de recherche fut relativement courte à cause de la redondance des articles obtenus même avec le changement de mots clés. Certains moteurs de recherche étaient à disposition mais n'ont pas été utilisés, faute de connaissance de leur existence. Certains articles ont été écartés à cause d'un contexte géographique trop différent (autres pays), en raison de la variabilité d'une population à une autre. Ces manquements aboutissent à un faible nombre d'article retenus. Ce point peut aussi être attribué au nombre relativement faible d'étude sur l'écologie du silure glane dans son aire d'introduction, même si cette affirmation formulée par *Copp et al.* en 2009 a perdu en validité ces dernières années avec l'intérêt croissant pour cette espèce et l'augmentation d'études de son impact sur les écosystèmes locaux.

III- Élaboration d'un protocole de mesure des variables environnementales

Introduction

À l'aide des réflexions proposées dans la section précédente, le cadre d'un protocole a été pensé pour chaque variable environnementales. Ce protocole n'a pas pour but d'être un guide point par point de la démarche à suivre mais plutôt une proposition d'action permettant l'acquisition d'une base de données permettant l'étude des variables environnementales en fonction de la densité du silure glane.

Matériel et méthodes

1) Choix des variables

L'objectif de cette section est d'établir un protocole permettant de mesurer des variables environnementales qui maximise la précision et l'applicabilité sans négliger la pertinence de la mesure avec les densités obtenues à l'aide de la méthode de prospection de terrain décrite dans la section I. Les variables environnementales retenues sont les variables classées pertinentes dans la partie II (**température, hauteur d'eau, structuration des habitats et luminosité**) auxquelles on ajoute le **type de végétation**, une variable potentielle jugée intéressante et facile à mettre en place. Les variables environnementales seront séparées en 3 catégories :

- La bathymétrie (Hauteur d'eau)
- Les paramètres pris en continu sur la durée de l'étude (Luminosité et température)
- Les paramètres déterminés par une prospection de terrain (Habitats et végétation)

2) Mesure des différents paramètres

Le paramètre hauteur d'eau est mesuré par bathymétrie dans le but de délimiter les fosses et de calculer le volume disponible pour chaque segment. La précision de la bathymétrie doit également être normalisée à la surface moyenne des segments. La délimitation des fosses et le calcul de son volume doivent être approprié à la caractérisation du tronçon du cours d'eau étudié et être en accord avec la résolution de la bathymétrie. L'idéal serait la prise des données bathymétriques dans des conditions hydrologiques similaire afin de limiter la variation du niveau d'eau.

Le paramètre de température est mesuré en continu à l'aide d'une sonde. La prise ponctuelle de température d'un cours d'eau n'est pertinente sans son contexte spatio-temporel. Les variations journalières de température d'un cours d'eau en période estivale peuvent être conséquente, de la même manière qu'une mesure prise à la surface sera bien plus élevée qu'une température prise près du fond. Une solution à aux variations temporelles est la prise en continue de données sur la période de prospection, permettant ainsi d'obtenir des valeurs statistiques qui sont équivalentes pour chaque segment prospecté. La variation spatiale pourrait être limitée par la prise de température à différents points de la colonne d'eau.

La luminosité est également une variable qui peut être soumise à de nombreuses incertitudes. La luminosité au sein d'un cours d'eau dépend de la hauteur de la colonne d'eau au-dessus de l'appareil de mesure et de variations temporelles comme le climat, la saisonnalité ou simplement les variations journalières. De la même manière que pour la température, la prise en continue des données permet d'annuler les variations temporelles. Le paramètre de hauteur d'eau est bien plus compliqué à limiter et peut varier en fonction du débit. Trois solutions permettent d'y répondre :

- La première serait de mettre en place plusieurs appareils de mesure à différentes hauteurs
- La deuxième serait de suivre avec précision ou de simuler en fonction du débit la hauteur d'eau au niveau de l'appareil de mesure
- La troisième serait de négliger ce facteur en supposant que la différence de variation de hauteur d'eau des différents segments en fonction du débit n'est pas significative

Dans cette version du protocole, ce facteur sera négligé pour des soucis de simplicité. La lumière peut-être calculer sous forme de radiance ou d'intensité lumineuse selon les techniques utilisées. De nombreuses techniques permettent de reconvertir même la prise de photos en radiance lumineuse, différents appareils de mesure peuvent donc être envisagés.

La structuration des habitats est une variable plus compliquée à quantifier. Son évaluation doit suivre un protocole précis pour limiter tout biais lié à l'opérateur. Une solution serait une prospection le long d'une berge en délimitant les habitats évalués d'un arbre de décision permettant une estimation rapide sans calcul en fonction de différents critères :

- **Type d'habitat** (Sous-berges/racinaire/débris ligneux/couvert végétal par exemple)
- **Profondeur** (estimation perpendiculaire à la berge selon 4 ou 5 classes)
- **Hauteur** (estimation perpendiculaire à la berge selon 4 ou 5 classes)
- **Comblement** (estimation du taux de comblement selon 4 ou 5 classes)

La végétation peut être qualifiée visuellement, séparée en ripisylve et en hydrophytes.

Résultat

1) Prise de données bathymétriques

Cette section se déroule selon restriction technique et les moyens disponibles.

2) Mise en place de bouées pour les données continues

Pour chaque segment, la mise en place d'une bouée à un point représentatif de chaque segment pourrait permettre la prise de température en continue à différent hauteur de la colonne d'eau. La disposition de sonde thermiques à un certain pourcentage de la longueur totale de la corde permet la prise de données à la même fraction de la hauteur d'eau. La mise en place de plusieurs thermomètres permet également d'assurer la prise de données même en cas de dysfonctionnement de l'un d'entre eux.

Arbitrairement, le nombre de sonde est de 3 et elles sont positionnées à 80%, 50% et 20% de la longueur de la corde, mais ces valeurs peuvent être changées selon le cours d'eau étudiés et les moyens disponibles.

L'intensité lumineuse peut être prise de différentes manières, mais elle peut potentiellement être conjointe avec les bouées utilisées pour mesurer la température. L'objectif étant de mesurer l'intensité lumineuse à proximité du fond, la fixation de l'appareil pourrait se faire sur l'ancre de la bouée (si un dispositif permettant cette fixation y est aménagé) ou à la base de la corde (l'orientation en direction du zénith pouvant se faire à l'aide d'un système de lest).

La position de la bouée demande ainsi une certaine réflexion :

- Elle doit être positionnée de manière à ne pas gêner les usages
- Elle doit être positionnée afin d'éviter les vols et dégradations de matériel
- Elle doit être placée sur un site représentatif du segment en termes de température
- (Si mesure de luminosité) Elle doit être placée sur un site représentatif du segment en termes d'intensité lumineuse

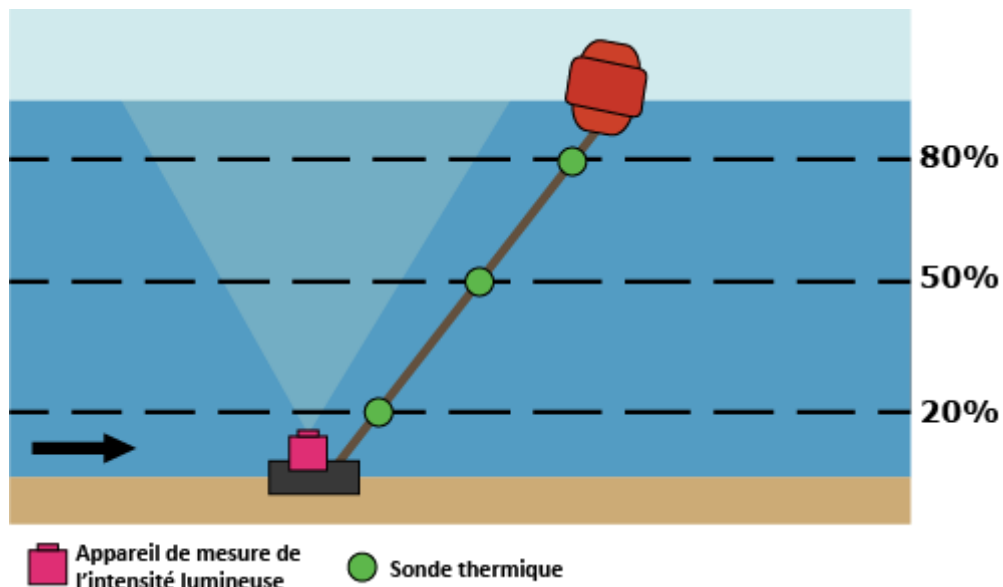


Figure 9 : schéma d'une bouée équipée pour des mesures continues

3) Prospection de terrain pour déterminer les habitats

Une prospection indépendante est effectuée pour chaque segment, permettant la caractérisation des habitats disponibles en berges sur le linéaire. Cette action se fait avec un opérateur en berge/embarqué et un ou plusieurs plongeurs. Même si le plongeur reste en surface et visible, l'opérateur en berge doit être équipé pour intervenir immédiatement pour des raisons de sécurité. Les consignes de sécurité sont les mêmes que celles des prospections pour le comptage.

L'opérateur en berge va accrocher un mesureur à fil perdu au début du segment et va suivre le plongeur et mesurer sur le linéaire. Le plongeur longe la berge et signale à l'opérateur en berge chaque habitat comme décrit dans la partie Méthode. Des signes simples pourraient permettre de

communiquer ces informations selon les classes déterminées. L'opérateur va renseigner l'ensemble des informations et la distance à l'origine associée.

La qualification de la ripisylve et des hydrophytes peut se faire par espèce dominantes et recouvrement. Elle se fait de manière indépendante après la plongée, sur la berge.

Discussion

Ce protocole n'est pas innovant dans son fonctionnement mais tente d'équilibrer la facilité de mise en œuvre, la fiabilité des mesures effectuées et la pertinence dans le contexte donné. Il ne tient en revanche pas compte du coût budgétaire et horaire nécessaire à sa mise en place. Certaines indications peuvent cependant aider à le réduire.

La mise en place de prise de données en continue permet une mesure véritablement fiable, dépendant de la pertinence de la position de la bouée. Un des inconvénients majeurs de cette méthode est la dégradation possible du matériel par d'autres usagers. La mise en place d'un appareil de mesure pour la luminosité à la base de la bouée dans un deuxième temps est peut-être compliquée à mettre en œuvre en fonction du matériel et du milieu et cette partie du protocole nécessite peut-être davantage de réflexion.

La partie prospection de terrain du protocole est plus expérimentale et une réflexion supplémentaire sur ce sujet pourrait mener à une meilleure estimation des habitats. L'utilisation de classes afin d'évaluer les habitats semble être la solution la plus facilement applicable, elle pourrait être complétée d'informations supplémentaires en dehors du volume utilisable afin d'avoir une qualification plus poussée des habitats.

Bibliographie

1. Belhamiti, N., and C. Boisneau. 2015. SILURUS: Etude du silure à l'échelle de la Loire en région Pays de la Loire. Rapport AADPPMFEDLA, SMIDAP, AELB, 124p.
2. Boisneau C, (2018). ALOSA 2016-17, Suivi des aloses en Loire moyenne 2016 et 2017 et première approche d'une estimation des densités de silures en Loire moyenne. Rapport de l'université de Tours, AELB, PLGN, 99p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02134961>.
3. Boisneau, C., Acou, A., Associations agréées des pêcheurs professionnels, Carpentier, A., Dublon, J., Feunteun, É., Jugé, P., Roy, R., Santoul, F., Structures associatives agréées de la pêche loisir, Trancart, T., Teichert, N., 2023. Modalités d'utilisation des habitats aquatiques et estimation de la densité des silures glanes en milieu naturel, in: Trancart, T., Robin, E., Feunteun, É. (Eds.), GlanisPoMi : Etude globale de la predation des migrateurs amphihalins par les silures (*Silurus glanis*) sur le bassin de la Loire. MNHN - Rapport d'étude du Muséum National d'Histoire Naturelle.
4. Boujard T. Diel rhythms of feeding activity in the European catfish, *Silurus glanis*. *Physiology & Behavior*. oct 1995;58(4):641-5.
5. Copp GH, Robert Britton J, Cucherousset J, García-Berthou E, Kirk R, Peeler E, et al. Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges*. *Fish and Fisheries*. sept 2009;10(3):252-82.
6. Cucherousset J, Horky P, Slavík O, Ovidio M, Arlinghaus R, Boulêtreau S, et al. Ecology, behaviour and management of the European catfish. *Rev Fish Biol Fisheries*. mars 2018;28(1):177-90.
7. Daněk T, Kalous L, Petrtýl M, Horký P. Move or die: change in European catfish (*Silurus glanis* L.) behaviour caused by oxygen deficiency. *Knowl Managt Aquatic Ecosyst*. 2014;(414):08.
8. Guillerault N, Delmotte S, Boulêtreau S, Lauzeral C, Poulet N, Santoul F. Does the non-native European catfish *Silurus glanis* threaten French river fish populations? *Freshwater Biology*. mai 2015;60(5):922-8.
9. Kędzior R, Kłonowska-Olejniki M, Dumnicka E, Woś A, Wyrębek M, Książek L, et al. Macroinvertebrate habitat requirements in rivers: overestimation of environmental flow calculations in incised rivers. *Hydro Earth Syst Sci*. 8 août 2022;26(15):4109-24.
10. Kemp JL, Harper DM, Crosa GA. Use of 'functional habitats' to link ecology with morphology and hydrology in river rehabilitation. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst*. janv 1999;9(1):159-78.
11. Lang Delus C. Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. cybergeog [Internet]. 29 nov 2011 [cité 23 janv 2024]; Disponible sur: <http://journals.openedition.org/cybergeog/24827>
12. Massabuau JC, Forgue J. Les capacités d'adaptation du silure glane en hypoxie : un cas exemplaire d'homéostasie du milieu intérieur. *Aquat Living Resour*. oct 1995;8(4):423-30.
- 13.

- Richter BD, Baumgartner JV, Powell J, Braun DP. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*. août 1996;10(4):1163-74. 14.
- Schlumberger O, Saggiocco M, Proteau JP. BIOGÉOGRAPHIE DU SILURE GLANE (*SILURUS GLANIS*) : CAUSES HYDROGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES. *Bull Fr Pêche Piscic*. 2001;(357-360):533-47. 15.
- Souchon Y, Tissot L. Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. *Knowl Managt Aquatic Ecosyst*. 2012;(405):03. 16.
- Syväranta J, Cucherousset J, Kopp D, Martino A, Céréghino R, Santoul F. Contribution of anadromous fish to the diet of European catfish in a large river system. *Naturwissenschaften*. mai 2009;96(5):631-5. 17.
- Tennant DL. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*. juill 1976;1(4):6-10. 18.
- Trancart, T., Robin, E., Acou, A., Associations agréées des pêcheurs professionnels, Boisneau, C., Carpentier, A., Dublon, J., Feunteun, É., Juge, P., Lamoureux, J., Rault, P., Roy, R., Santoul, F., Structures associatives agréées de la pêche loisir, Teichert, N., 2023. Déplacements et activité des silures glanes *Silurus glanis* de grande taille (> 120 cm) dans le bassin de la Vienne, in: Trancart, T., Robin, E., Feunteun, E. (Eds.), *GlanisPoMi : Etude globale de la prédation des migrateurs amphihalins par les silures (*Silurus glanis*) sur le bassin de la Loire*. MNHN - Rapport d'étude du Muséum National d'Histoire Naturelle. 19.
- Vagnon C. The European catfish (*Silurus glanis*) in large peri-alpine lakes: trophic ecology and impacts for resident species. 2021; 20.
- VALADOU B. Le silure glane (*Silurus glanis*, L.) en France. Evolution de son aire de répartition et prédiction de son extension. 2007. 21.
- Vejřík L, Vejříková I, Kočvara L, Blabolil P, Peterka J, Sajdlová Z, et al. The pros and cons of the invasive freshwater apex predator, European catfish *Silurus glanis*, and powerful angling technique for its population control. *Journal of Environmental Management*. juill 2019;241:374-82. 22.
- Westrelin S, Stéphanie B, Frédéric S. European catfish *Silurus glanis* behaviour in response to a strong summer hypoxic event in a shallow lake. *Aquat Ecol*. déc 2022;56(4):1127-42.

Annexes

1) Calcul du VCN30

Première méthode

- Extraction des données sur l'onglet « Série de mesure » Hydroportail (Station *K480 0010 01*)
 - **Visualiser les mesures** : Du 01/01/2016 au 31/12/2023
 - **Type de grandeur** : Journalier – Débit moyen du n jour (n=1)
 - **Statut par défaut des mesures** : Données les plus valides
 - *Extraction en .csv*
- Ouverture sur Excel (Attention certaines mesures sont décimales et Excel les supprime par défaut)
- Calculer le débit moyen sur trente jours suivant la case
 - **Formule** : `=SI(F2=F31;SOMME(G2:G31)/30;"")` avec *F* colonne année et *G* colonne du débit
- Prendre la valeur minimum sur l'année
 - **Exemple de formule** : `=MIN(H2:H338)` avec *H* colonne de la formule ci-dessus

Deuxième méthode

- Vérifier la donnée sur hydroportail dans l'onglet « statistiques »
 - « Basses eaux > Simuler une nouvelle analyse »
 - Depuis le « 01/01/2016 » + jusqu'au « 31/12/2023 » + débit moyen sur n jours
 - Pas de temps : 30 et cocher **Observation avec fenêtre glissante**
 - Passer jusqu'à **Extraction de variable**
 - Sélectionner « Année d'étiage du site » et « Minimum »
 - *Extraction des données en csv*

2) Calcul de la durée d'étiage

- Extraction des données sur l'onglet « Série de mesure » Hydroportail (Station *K480 0010 01*)
 - **Visualiser les mesures** : Du 01/01/2016 au 31/12/2023
 - **Type de grandeur** : Journalier – Débit moyen du n jour (n=1)
 - **Statut par défaut des mesures** : Données les plus valides
 - *Extraction en .csv*
- Extraction du Q90 sur l'onglet
- Ouverture sur Excel (Attention certaines mesures sont décimales et Excel les supprime par défaut)
- Nouvelle colonne, vérifier pour chaque débit journalier s'il est supérieur à la valeur seuil choisie
 - Si elle est supérieure, la case prend la valeur 0
 - Si elle est inférieure, elle prend la valeur de la case au-dessus et ajouter 1
 - Attention, la première case doit être rentré manuellement comme 0
 - **Exemple de formule** : `=SI(G3<(P2*0.3);I2+1;0)` avec
- Prendre la valeur maximale sur l'année
 - **Exemple de formule** : `= MAX(J2:J340)` avec *J* colonne de la formule ci-dessus

3) Tableau récapitulatif de la bibliographie

Titre de l'article	Auteur	Date	EDP	Sciedirect	Springer	Researchgate	Google Scholar	HAL	Disponible	Conservé	Raison de l'écart
									1	0	
BIOGÉOGRAPHIE DU SILURE GLANE (SILURUS GLANIS) : CAUSES HYDROGRAPHIQUES, CLIMATIQUES ET ANTHROPIQUES.	Schlumberger	2001	x			x	x	x	1	1	
The culture of the European catfish, <i>Silurus glanis</i> , in the Czech Republic and in France	Linhart	2002	x	x		x	x		1	0	Étude sur l'aquaculture
Move or die: change in European catfish (<i>Silurus glanis</i> L.) behaviour caused by oxygen deficiency	Daněk	2014	x	x					1	1	
Different growth and processing traits in males and females of European catfish, <i>Silurus glanis</i>	Haffray	1998	x				x		1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Alimentation des juvéniles de <i>Silurus glanis</i> en élevage intensif	Schlumberger	1995	x				x		1	0	Étude sur l'aquaculture
Production et gestion des spermatozoïdes chez le poisson-chat européen <i>Silurus glanis</i>	Saad	1995	x						1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Ultrastructural studies of sperm penetration in the egg of the European catfish, <i>Silurus glanis</i>	Kudo	1994	x						1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Survival of ovulated oocytes of the European catfish (<i>Silurus glanis</i>) after in vivo and in vitro storage or exposure to saline solutions and urine	Linhart	1995	x						1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Sperm management of European catfish (<i>Silurus glanis</i> L.) for effective reproduction and genetic conservation	Linhart	2020		x					1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
The biological invasion of an apex predator (<i>Silurus glanis</i>) amplifies PCB transfer in a large lake food web	Frossard	2023		x			x		1	0	Étude sur l'écotoxicologie
Heavy metals distribution in muscle, liver, kidney and gill of European catfish (<i>Silurus glanis</i>) from Italian Rivers	Squadrone	2013		x					1	0	Étude sur l'écotoxicologie
Mercury and selenium in European catfish (<i>Silurus glanis</i>) from Northern Italian Rivers: Can molar ratio be a predictive factor for mercury toxicity in a top predator?	Squadrone	2015		x					1	0	Étude sur l'écotoxicologie
Organochlorine compounds in European catfish (<i>Silurus glanis</i>) living in river areas under the influence of a chlor-alkali plant (Ebro River basin)	Huertas	2016		x					1	0	Étude sur l'écotoxicologie
Influence of rearing conditions and feed on the biochemical composition of filets of the European catfish (<i>Silurus glanis</i>)	Hallier	2007		x			x		1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
NDL-PCBs in muscle of the European catfish (<i>Silurus glanis</i>): An alert from Italian rivers	Squadrone	2013		x					1	0	Étude sur l'écotoxicologie
New gas chromatography–olfactometric investigative method, and its application to cooked <i>Silurus glanis</i> (European catfish) odor characterization	Hallier	2004		x					1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Optimization of artificial propagation in European catfish, <i>Silurus glanis</i> L.	Linhart	2004		x					1	0	Étude sur l'aquaculture
Effects of iridovirus-like agent on the cell-mediated immunity in sheatfish (<i>Silurus glanis</i>)—an in vitro study	Siwicki	1999		x					1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Moisture evaluation of β -cyclodextrin/fish oils complexes by thermal analyses: A data review on common barbel (<i>Barbus barbus</i> L.), Pontic shad (<i>Alosa immaculata</i> Bennett), European wels catfish (<i>Silurus glanis</i> L.), and common bleak (<i>Alburnus alburnus</i> L.) living in Danube river	Hădăruță	2017		x					1	0	Étude sur l'écotoxicologie
Diel rhythms of feeding activity in the European catfish, <i>Silurus glanis</i>	Boujard	1995		x					1	1	
European catfish <i>Silurus glanis</i> , and powerful angling technique for its population control	Vejřík	2019		x					1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
European catfish <i>Silurus glanis</i> behaviour in response to a strong summer hypoxic event in a shallow lake	Westrelin	2022			x			x	1	1	
Age and growth of the European catfish (<i>Silurus glanis</i>) in a Turkish Reservoir and comparison with introduced populations	Alp	2011			x				1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Patterns of genetic variation in native and non-native populations of European catfish <i>Silurus glanis</i> across Europe	Castagné	2023			x		x		1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Impact of commercial probiotics on growth parameters of European catfish (<i>Silurus glanis</i>) and water quality in recirculating aquaculture systems	Zibiene	2019			x				1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Exceptional longevity in northern peripheral populations of Wels catfish (<i>Silurus glanis</i>)	Bergström	2022			x				1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Slaughter value and flesh characteristics of European catfish (<i>Silurus glanis</i>) fed natural and formulated feed under different rearing conditions	Jankowska	2007			x				1	0	Sujet n'est pas variables environnementales

Titre de l'article	Auteur	Date	EDP	Scienccdirect	Springer	Researchgate	Google Scholar	HAL	Disponibilité		Raison de l'écart
									Disponible	Conservé	
Overwintering aggregation patterns of European catfish <i>Silurus glanis</i>	Westrelin	2023			x	x	x		1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Ecology, behaviour and management of the European catfish	Cucherousset	2018			x				1	1	
Odour of cooked silurus (<i>Silurus glanis</i>) flesh: Evaluation by sensory analysis and comparison of collection methods to assess the odour representativeness of extracts obtained by dynamic headspace	Hallier	2004				x			1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
catfish <i>Silurus glanis</i> in the River Tarn (Garonne River basin), Southwest France	Syväranta	2010				x	x		1	1	
environmental biology of European catfish <i>Silurus glanis</i> in its native and introduced range	Copp	2009				x	x		1	1	
Environmental conditions and neutral processes shape the skin microbiome of European catfish (<i>Silurus glanis</i>) populations of Southwestern France	Chiarello	2019	x			x	x		0	0	Non disponible
The wels catfish <i>Silurus glanis</i> Linnaeus, 1758 (Actinopterygii Siluriformes) in Italian waters: a review with first report in the Bolsena lake (Italy)	Mancini	2022					x		1	0	
Behaviour of two predator fishes <i>Esox lucius</i> Linnaeus, 1758 and <i>Silurus glanis</i> Linnaeus, 1758 during two successive floods in the French Aisne River	Chevallier	2023				x	x	x	1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Application of DNA metabarcoding on faeces to identify European catfish <i>Silurus glanis</i> diet	Guilleraut	2017					x		1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Does the non-native European catfish <i>Silurus glanis</i> threaten French river fish populations?	Guilleraut	2015					x	x	1	1	
Evolution de son aire de répartition et prédiction de son extension.	Valadou	2007					x		1	1	
Etudes des interactions du Silure glane (<i>Silurus glanis</i>) avec l'ichtyofaune métropolitaine	Guilleraut	2015					x		1	0	
"Freshwater killer whales": beaching behavior of an alien fish to hunt land birds	Cucherousset	2012						x	1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Is European catfish a threat to eels in southern France?	Martino	2011						x	1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Les tribulations du silure glane (<i>Silurus glanis</i> Linnaeus 1758) en bassin rhénan, de l'âge du Bronze à l'époque moderne	Putelat	2021						x	1	0	Sujet n'est pas variables environnementales
Contribution of anadromous fish to the diet of European catfish in a large river system	Syväranta	2009						x	1	0	
The European catfish (<i>Silurus glanis</i>)	Schlumberger	2001						x	0	0	Non disponible
Systematique : Ordre des Siluriformes. Le Silure glane (<i>Silurus glanis</i>)	Schlumberger	2001						x	0	0	Non disponible



Directeur.rice de recherche :

Catherine Boisneau

Alan Fritsch
PFE/DAE5
IMA
2023-2024

EVOLUTION INTERANNUELLES DE DENSITES DE SILURE EN ETIAGE DANS LA LOIRE

Résumé : Cette étude comprend trois volets en rapport avec l'étude de densité du silure glane (*Silurus glanis*) dans la partie médiane de la Loire. La première reprend des données de densité du silure dans la Loire obtenues sur les 8 dernières années et le met en relation avec les caractéristiques d'étiages. La seconde est une étude bibliographique sur l'écologie du silure et classe différentes variables environnementales selon leur pertinence dans l'étude de la répartition du silure à l'échelle du mésohabitat. La dernière établit un protocole permettant de mesurer les variables environnementales jugées pertinentes dans la seconde partie afin de permettre l'étude de la densité des populations de silure en fonction de ces variables.

Mots Clés : Écologie, Silure, Statistiques, Variables environnementales