



Action financée avec le concours de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne

Partenariat 2019

**ESTIMATION DE LA BIOMASSE DE MIGRATEURS ANADROMES CONSOMMÉE PAR LE SILURE GLANE (*SILURUS GLANIS L.*) DANS LA PARTIE AVAL DE LA GARONNE :
approche par couplage de modélisations génétiques et bio-énergétiques.**

RAPPORT D'ÉTUDE

Ivan PAZ-VINAS, Frédéric SANTOUL



Laboratoire Écologie fonctionnelle et environnement ECOLAB ; UMR UPS INP CNRS 5245
Campus UPS ; 118, route de Narbonne – Bâtiment 4R1 31062 Toulouse Cedex 9
France

Juillet 2019

CONTEXTE DE PROGRAMMATION ET DE RÉALISATION

Le silure glane (*Silurus glanis*) est l'un des plus grands poissons d'eau douce au monde et **le plus grand en Europe** (Boulêtreau & Santoul, 2016; Cucherousset et al., 2018; Stone, 2007). Les silures adultes peuvent mesurer plus de deux mètres (un individu de 2,74 mètres a été pêché dans le Tarn en 2017 ; Chiarello et al., 2019). En France, le silure atteint donc plus de **deux fois la taille des prédateurs natifs** comme le brochet (> 1 m). Ceci a pour conséquence **d'augmenter potentiellement la taille refuge des proies**, c'est-à-dire la taille maximale à laquelle ces dernières ne sont plus prédatées. Des espèces de poissons telles **certaines espèces anadromes** (espèces migratrices vivant en mer mais remontant les cours d'eau pour s'y reproduire comme le saumon atlantique, la lamproie, la grande alose ou l'alose feinte) qui échappaient, de par leur grande taille, à la prédation **sont désormais susceptibles d'être consommées par le silure**.

Les chutes d'effectifs constatées chez ces espèces migratrices et les différents comportements de prédation d'espèces migratrices **observés chez le silure** (ex. Boulêtreau et al., 2018) soulèvent donc de nombreuses interrogations concernant **l'impact du silure sur l'ensemble des espèces anadromes** remontant la Garonne depuis l'Océan Atlantique pour se reproduire.

En effet, de précédents travaux ont montré que **certaines espèces anadromes constituent une part non négligeable du régime alimentaire des silures dans le bassin de la Garonne** (Guillerault et al., 2019; Boulêtreau et al., 2018; Guillerault et al., 2017; Syväranta et al., 2009). Néanmoins, la **quantité de biomasse d'origine marine totale consommée par les silures chaque année** dans le bassin de la Garonne **reste inconnue**.

La **quantification de l'impact potentiel du silure sur les espèces migratrices de la Garonne s'est avérée longtemps impossible** en raison d'un verrou méthodologique, à savoir **l'impossibilité d'estimer correctement les effectifs de silure présents dans de grands milieux ouverts comme la Garonne** ou d'autres rivières comme la Dordogne ou le Tarn. Or, toute estimation de l'impact potentiel d'un prédateur dans un milieu donné repose en grande partie sur la connaissance du stock de ce prédateur présent dans le milieu en question.

Les progrès récents dans le domaine de la génétique des populations permettent désormais de quantifier de façon indirecte des paramètres démographiques d'intérêt comme les flux de gènes entre populations ou les tailles efficaces des populations, et ceci à des échelles très fines. Ainsi, il est désormais possible **de reconstruire l'histoire démographique d'une espèce** grâce aux empreintes que certains événements (introductions d'individus, expansions ou contractions démographiques) laissent dans l'ensemble de gènes présents dans ses populations. Toutes ces informations, inférées à partir de données génétiques, peuvent alors être utilisées pour **estimer des abondances et des densités grâce à des traitements statistiques spécifiques**. L'application de ces techniques nous a récemment permis de fournir **une évaluation du stock de silure dans la partie aval de la Garonne, ainsi que dans ces principaux affluents** (Projet EcoLab – UFBAG – AEAG 2016-2018 ; voir Paz-Vinas & Santoul, 2018). Cette étude récente a donc permis de **lever le verrou**

méthodologique qui empêchait l'estimation de l'impact potentiel du silure sur les espèces migratrices du bassin de la Garonne.

Au vu de ces avancées, et des connaissances acquises lors de plusieurs études précédentes concernant l'écologie, le régime alimentaire et les traits d'histoire de vie du silure, nous avons mené à bien la présente étude, dont **l'objectif était de fournir une première estimation de la biomasse de migrateurs anadromes consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne**. Pour cela, nous avons couplé (i) les données relatives à **l'estimation des effectifs de silures** présents dans la partie aval de la Garonne obtenues lors de l'étude génétique susmentionnée, (ii) **des connaissances obtenues au travers d'autres études scientifiques** menées sur le silure dans la Garonne (ex. identification des proies consommées par le silure par l'analyse de contenus stomacaux et/ou analyse de l'ADN présent dans ses fèces, études isotopiques) et (iii) **des données disponibles dans la littérature** (ex. données concernant la quantité de biomasse journalière ingérée par l'espèce).

LES AUTEURS

Ivan Paz-Vinas

Ingénieur de Recherche (IR) en CDD – Université Paul Sabatier Toulouse 3 ; UMR 5245 ECOLAB

ivanpaz23@gmail.com

Frédéric Santoul

Maître de Conférences – Université Paul Sabatier Toulouse 3 ; UMR 5245 ECOLAB

frederic.santoul@univ-tlse3.fr

LES CORRESPONDANTS

Syndicat Mixte d'Études & d'Aménagement de la Garonne – Pôle technique : Poissons migrateurs et Qualité de l'eau

Aline Chaumel

Pôle technique : Poissons migrateurs et Qualité de l'eau

Aline.CHAUMEL@smeag.fr

Partenaire scientifique – Université Paul Sabatier Toulouse 3 ; UMR 5245 ECOLAB :

Frédéric Santoul

Maître de Conférences

frederic.santoul@univ-tlse3.fr

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les pêcheurs à la ligne, les pêcheurs professionnels et l'association MIGADO qui ont contribué à l'obtention de certaines données utilisées dans cette étude. Nous remercions aussi Ignasi Arranz Urgell pour les discussions concernant la modélisation du spectre de tailles corporelles. Nos remerciements vont aussi aux divers collaborateurs qui ont contribué aux études scientifiques mentionnées dans ce rapport ; études desquelles certains résultats ont été utilisés pour mener à bien nos calculs ; et aux financeurs de cette étude.

RÉSUMÉ (FRANÇAIS)

Le silure glane (*Silurus glanis*) est le plus grand poisson d'eau douce en Europe. En France, où le silure a été largement introduit, le silure atteint plus de deux fois la taille des prédateurs natifs comme le brochet. Ceci a pour conséquence d'augmenter la taille maximale à partir de laquelle les proies ne sont plus prédatées. Des espèces comme les espèces migratrices anadromes qui échappaient à la prédation jusqu'alors sont désormais susceptibles d'être consommées par le silure.

L'objectif de cette étude était de fournir une estimation de la biomasse de migrateurs anadromes adultes consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne. Pour y parvenir, nous avons couplé des données issues de plusieurs études scientifiques concernant principalement la population de silures de la partie aval de la Garonne, et appliqué deux approches méthodologiques différentes.

Ainsi, nous avons estimé que le silure consomme annuellement une quantité de 210,1 [intervalle de confiance = 36,3 – 791,5] ou 244,4 [40,6 – 931,4] tonnes de migrateurs anadromes adultes, selon la méthode considérée. Les intervalles de confiance importants montrent qu'il reste encore difficile d'obtenir des estimations précises dans ces grands écosystèmes ouverts. Cependant, ces estimations suggèrent que le silure a un impact important sur les populations d'espèces migratrices anadromes adultes dans la partie aval de la Garonne, et devraient aider les gestionnaires à développer des actions et des politiques adaptées à la gestion des populations de silures et des espèces migratrices.

ABSTRACT (ANGLAIS)

The European catfish (*Silurus glanis*) is the largest freshwater fish in Europe. In France, where the catfish has been widely introduced, it reaches more than twice the size of native predators such as pike, which has the effect of increasing the maximum size at which preys are no longer predated. Anadromous migratory species that previously escaped from predation are now likely to be predated by the European catfish.

The objective of this study was to estimate the biomass of adult anadromous migrants consumed per year by the European catfish in the downstream part of the Garonne River. We coupled data from several scientific studies mainly focused on the catfish population of the lower Garonne and applied two different methodological approaches to meet our objective.

We estimate that the European catfish consumes an amount of 210.1 [confidence interval = 36.3 - 791.5] or 244.4 [40.6 - 931.4] tons of adult anadromous migrants per year, depending on the method considered. These estimates suggest that the European catfish has a significant impact on anadromous migratory species populations in the lower Garonne, and should help managers to develop appropriate actions and policies for the management of catfish populations and migratory species.

SOMMAIRE

CONTEXTE DE PROGRAMMATION ET DE RÉALISATION	2
LES AUTEURS	4
LES CORRESPONDANTS	4
REMERCIEMENTS.....	5
RÉSUMÉ (FRANÇAIS)	6
ABSTRACT (ANGLAIS).....	7
SOMMAIRE	8
NOTE DE SYNTHÈSE.....	9
CORPS DU DOCUMENT	11
PARTIE I : DÉMARCHE GÉNÉRALE ET RAISONNEMENT ADOPTÉS POUR ESTIMER LA BIOMASSE DE MIGRATEURS ANADROMES CONSOMMÉE PAR LES SILURES.....	11
PARTIE II : ESTIMATION DE LA BIOMASSE DE MIGRATEURS ANADROMES CONSOMMÉE ANNUELLEMENT PAR LES SILURES DANS LA PARTIE AVAL DE LA GARONNE.....	20
(i) MÉTHODE « PAR EXTRAPOLATION »	21
(ii) MÉTHODE « PAR MODÉLISATION » :.....	27
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	35
BIBLIOGRAPHIE.....	36

NOTE DE SYNTHÈSE

Cette note résume de façon très synthétique le contexte de l'étude, les méthodes et les résultats obtenus. Une figure schématique est fournie à titre illustratif. Pour une description plus détaillée et approfondie de tous ces éléments, veuillez vous référer au « Corps du document » ci-dessous.

Le silure glane (*Silurus glanis*) est le plus grand poisson d'eau douce en Europe. En France, où le silure a été largement introduit, le silure atteint plus de deux fois la taille des prédateurs natifs comme le brochet. Ceci a pour conséquence d'augmenter la taille maximale à partir de laquelle les proies ne sont plus prédatées. Des espèces comme les espèces migratrices anadromes qui échappaient à la prédation jusqu'alors sont désormais susceptibles d'être consommées par le silure.

Il est donc important de comprendre les effets que le silure peut avoir sur les espèces migratrices anadromes. Pour cela, nous avons mené à bien la présente étude, dont l'objectif était de **fournir une première estimation de la biomasse de migrants anadromes adultes consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne**. Ceci a été fait en couplant des données issues de plusieurs études scientifiques concernant principalement la population de silures de la partie aval de la Garonne.

Pour atteindre cet objectif, il fallait répondre au préalable à plusieurs questions liées à l'écologie et à la physiologie du silure, à savoir :

1. Quelle est la **durée de la période de migration** des espèces anadromes susceptibles d'être consommées par le silure ?
2. Quelle **quantité de biomasse journalière est consommée** par le silure ?
3. Quelle est la **proportion de biomasse d'origine marine dans le régime alimentaire des silures** ?
4. Quelle **partie de la population** de silures est **susceptible de consommer des migrants adultes** ?
5. Quel est le **poids de chaque individu, en fonction de sa taille corporelle**, dans cette population ?
6. Quel est le **nombre de silures présents** dans la partie aval de la Garonne ?
7. Quelle est la **structure de tailles corporelles des individus** composant la population de silures de la partie aval de la Garonne ?

La plupart des questions susmentionnées (synthétisées dans la Figure ci-dessous) **ont été traitées auparavant** dans plusieurs études déjà réalisées ou actuellement en cours. Dans la présente étude, nous apportons des réponses aux questions n'ayant pas encore été traitées auparavant, puis nous mettons en commun **les réponses à toutes ces questions**, ce qui nous a permis d'effectuer tous les calculs intermédiaires nécessaires à la réalisation de notre objectif, à savoir déterminer la **quantité de biomasse d'origine marine (et donc, de migrants anadromes adultes) consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne** (question n°8 dans la Figure synthétique ci-dessous).

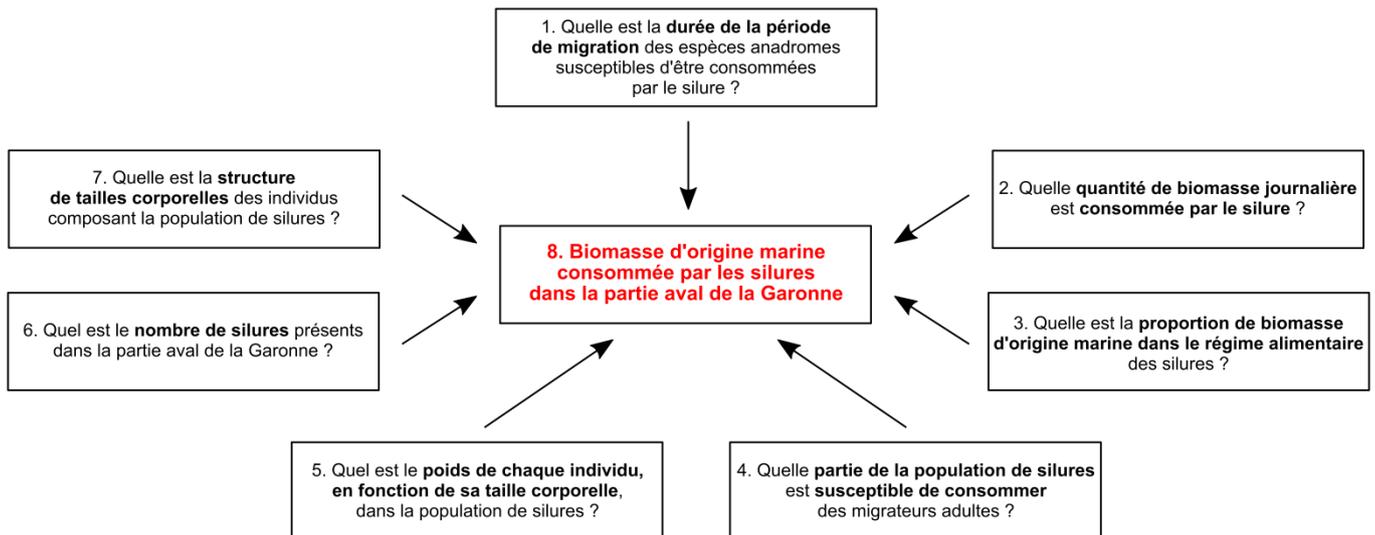


Figure synthétique : Représentation schématisée des différentes questions (1 à 7) auxquelles il était nécessaire de répondre pour pouvoir estimer la biomasse d'origine marine consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne (point 8).

Ainsi, en utilisant deux approches méthodologiques différentes pour estimer la structure de tailles corporelles de la population de silures de la partie aval de la Garonne (réponse à la question n°7), nous avons estimé une quantité de **210,1 [intervalle de confiance = 36,3 – 791,5] tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an.**

Ces estimations suggèrent donc que le silure a un impact important sur les populations d'espèces migratrices anadromes adultes dans la partie aval de la Garonne. Notons que **ces estimations ne concernent que la biomasse qui provient de la consommation de migrateurs anadromes adultes, et ne prennent pas en compte les impacts potentiels chez les juvéniles.**

Ici, nous fournissons des estimations basées sur des calculs qui prennent en compte divers paramètres estimés dans plusieurs études différentes, avec des degrés d'incertitude propres à chaque étude et chaque paramètre. Les **intervalles de confiance larges que nous fournissons prennent en compte ces diverses incertitudes.** Une étude à plus large échelle, qui aurait comme objectif de réaliser toutes les étapes décrites dans ce rapport à partir d'un seul et même échantillonnage commun, pourrait permettre, dans le futur, d'affiner ces estimations pour limiter les incertitudes autour des valeurs estimées. Néanmoins, ces premières estimations devraient permettre déjà aux gestionnaires de mieux évaluer l'impact potentiel du silure sur les espèces migratrices anadromes dans la partie aval de la Garonne, et ainsi les aider à **développer des actions et des politiques adaptées à la gestion des populations silure et des espèces migratrices.**

CORPS DU DOCUMENT

Dans cette section, nous allons détailler les différentes étapes qui nous ont permis de répondre à l'objectif défini dans la section « Contexte de programmation et de réalisation » ici-haut, à savoir **fournir une estimation de la biomasse de migrateurs anadromes consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne.**

Dans la première partie de ce rapport nous allons détailler la démarche générale et le raisonnement que nous avons suivi pour aboutir à l'estimation de la biomasse de migrateurs anadromes consommée par le silure annuellement dans la partie aval de la Garonne. Nous résumerons brièvement les études qui ont permis d'obtenir les différentes données intermédiaires utilisées pour le calcul de cette biomasse.

Dans la deuxième partie, nous détaillerons les calculs effectués en utilisant deux variantes méthodologiques, puis nous présenterons les résultats de nos estimations.

PARTIE I : DÉMARCHE GÉNÉRALE ET RAISONNEMENT ADOPTÉS POUR ESTIMER LA BIOMASSE DE MIGRATEURS ANADROMES CONSOMMÉE PAR LES SILURES.

Afin de pouvoir estimer correctement la quantité de **biomasse d'origine marine consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne**¹, il fallait répondre au préalable à plusieurs questions capitales relatives à l'écologie et à la physiologie de cette espèce (voir Figure 1), à savoir :

1. Quelle est la **durée de la période de migration** des espèces anadromes susceptibles d'être consommées par le silure ?
2. Quelle **quantité de biomasse journalière est consommée** par le silure ?
3. Quelle est la **proportion de biomasse d'origine marine dans le régime alimentaire des silures** ?
4. Quelle **partie de la population** de silures est **susceptible de consommer des migrateurs adultes** ?
5. Quel est le **poids de chaque individu, en fonction de sa taille corporelle**, dans cette population ?
6. Quel est le **nombre de silures présents** dans la partie aval de la Garonne ?
7. Quelle est la **structure de tailles corporelles des individus** composant la population de silures de la partie aval de la Garonne ?

Théoriquement, les réponses aux questions 1, 2 et 3 devraient nous permettre d'estimer la **proportion de biomasse d'origine marine**² **consommée par chaque silure en fonction de**

¹ Nous considérerons tout au long de ce rapport que la partie aval de la Garonne correspond à la section de rivière allant de la confluence Garonne-Dordogne, en Gironde, jusqu'à l'aval de la centrale hydroélectrique de Golfech.

² Nous considérons dans ce rapport que la biomasse d'origine marine consommée par le silure provient essentiellement des migrateurs anadromes adultes. L'apport d'autres espèces d'origine marine sera considérée comme négligeable tout au long de cette étude.

son poids pendant toute la période de migration, alors que les réponses aux questions 4, 5, 6 et 7 devraient nous permettre de déduire la **biomasse totale de silures susceptibles de consommer des migrateurs adultes** dans la partie aval de la Garonne.

Ainsi, en couplant ces nouvelles connaissances obtenues grâce aux réponses aux questions 1 à 7, nous devrions être à même d'atteindre notre objectif, à savoir **estimer la biomasse totale d'origine marine consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne**.

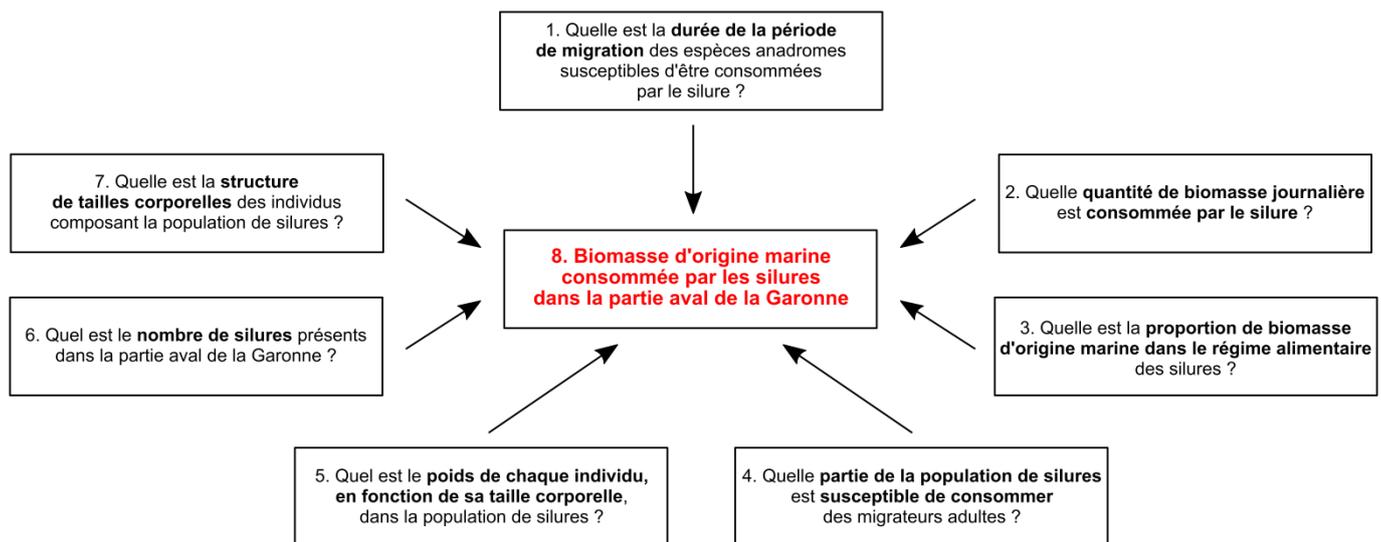


Figure 1 : Représentation schématique des différentes questions auxquelles il est nécessaire de répondre pour pouvoir estimer la biomasse d'origine marine consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne.

Il s'avère que **la plupart des questions susmentionnées ont été traitées auparavant** dans plusieurs études déjà réalisées ou actuellement en cours. **Les résultats de ces études, qui concernaient** pour la quasi-totalité **la population de silures de la partie aval de la Garonne**, vont donc pouvoir être mis en commun afin d'effectuer tous les calculs intermédiaires nécessaires à la réalisation de notre objectif. Certaines questions, comme par exemple la question n°7 (Figure 1) n'ont pas été traitées auparavant. Nous disposons, néanmoins, de suffisamment d'éléments et de données brutes pour y répondre. **Deux approches différentes ont été utilisées** lors de cette étude **pour estimer la structure de tailles corporelles de la population de silures** de la partie aval de la Garonne, et ainsi répondre à cette question n°7. Elles seront détaillées notamment dans la Partie II de ce rapport, qui est consacrée aux calculs.

Nous allons par la suite présenter brièvement les études et les résultats qui nous ont permis de répondre aux questions n° 1 à 7, afin de donner un aperçu des diverses approches méthodologiques ayant été utilisées pour obtenir ces résultats. Les réponses aux questions n° 1 à 7 serviront par la suite (Partie II) à effectuer les divers calculs intermédiaires permettant de répondre à la question n°8, à savoir : **quelle biomasse totale d'origine marine est consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne** (Figure 1).

1. Quelle est la durée de la période de migration des espèces anadromes susceptibles d'être consommées par le silure ?

D'après les diverses études et observations effectuées par l'association MIGADO (Migrateurs Garonne Dordogne), nous pouvons affirmer que **la période de migration des espèces anadromes dans la Garonne s'étale de mi-février à mi-juin selon les années**, couvrant ainsi une période d'une **durée comprise entre trois et quatre mois**. Au vu de ces observations, **nous considérerons trois durées de migration** différentes lors des calculs présentés en Partie II : une valeur correspondant à une phase de **migration courte** (égale à **90 jours**), une valeur correspondant à une phase de **migration longue** (égale à **120 jours**), et une valeur intermédiaire correspondant à une **durée de migration moyenne** (égale à **105 jours**).

2. Quelle quantité de biomasse journalière est consommée par le silure ?

Diverses études classiques d'Orlova, Popova et Stolyarov effectuées chez les populations de silure du delta de la Volga dans les années 70-80 ont permis de générer un ensemble de connaissances concernant la physiologie de l'espèce et, notamment, le régime et le comportement alimentaire du silure en milieu naturel (Orlova & Popova, 1976, 1987; Stolyarov, 1985). Ces travaux ont permis de déterminer que **le pourcentage de consommation journalière du silure varie entre 0,5 et 2% de son poids total**, en fonction de la saison et de la température. Ainsi, par exemple, un silure de 10 kg doit consommer en moyenne entre 50 et 200 grammes de biomasse par jour, alors qu'un gros silure de 100 kg devrait consommer entre 0,5 et 2 kg de biomasse par jour. En nous basant sur ces résultats, nous considérerons trois valeurs pour ce paramètre lors de nos futurs calculs (voir Partie II) : **0,5%, 1,25% et 2%**. La valeur de 1,25% correspond à une valeur moyenne entre 0,5 et 2%.

3. Quelle est la proportion de biomasse d'origine marine dans le régime alimentaire des silures ?

En 2019, Nicolas Guillerault et ses collaborateurs ont publié une étude dont le but était d'évaluer si la présence du barrage de Golfech affectait le régime alimentaire du silure dans la Garonne, en favorisant une augmentation de la proportion de proies anadromes dans le régime alimentaire des silures présents juste à l'aval du barrage par rapport à des silures présents dans une section de rivière « contrôle » située 20 à 50 km à l'aval du barrage (Guillerault et al., 2019). Grâce à des analyses isotopiques, ils ont montré que **la proportion de carbone d'origine marine dans le régime alimentaire du silure était importante et similaire entre les individus capturés juste à l'aval du barrage et ceux capturés dans la section « contrôle »**. En utilisant un modèle de mélange isotopique, ils ont estimé à **52% la proportion de proies d'origine marine dans le régime du silure** (N=64 silures inclus dans l'analyse), avec un **intervalle de confiance allant de 48% à 55%** (Guillerault et al., 2019). Nous utiliserons donc les trois valeurs susmentionnées (**48%, 52% et 55%**) lors des calculs présentés en Partie II, afin de tenir compte des incertitudes liées au modèle de mélange isotopique.

4. *Quelle partie de la population de silures est susceptible de consommer des migrateurs adultes ?*

Tout au long de ces dernières années, notre équipe a obtenu des **données de contenus stomacaux de silures** prélevés dans la Garonne, en collaboration avec des pêcheurs à la ligne amateurs, des pêcheurs professionnels et avec l'association MIGADO (N > 370). L'analyse de ces contenus stomacaux a mis en évidence que **les silures sont susceptibles de consommer des lamproies marines adultes lorsqu'ils ont atteint la taille seuil minimale de 120 cm**. Cette **taille minimale** est de **129-130 cm** pour que les silures soient capables de **consommer des grandes aloses**, sachant que ces dernières deviennent **fréquentes dans les contenus stomacaux à partir de 150 cm**. En nous basant sur ces données, nous considérerons trois tailles seuil minimales pour nos futurs calculs (voir Partie II) : **120, 135 et 150 cm**. La valeur de 135 cm correspond à une valeur moyenne entre 120 et 150 cm.

5. *Quel est le poids de chaque individu, en fonction de sa taille corporelle, dans la population de silures de la Garonne ?*

L'étude menée par Boulêtreau et Santoul (2016) a permis d'établir **une relation de type « Taille / Poids »** pour les silures présents dans le Sud de la France (elle a aussi démontré que le record longtemps supposé de taille et de poids chez le silure, à savoir 5 mètres de long pour 306 kg, était pure fantaisie et scientifiquement infondé). Cette étude est basée sur des mesures effectuées chez 171 individus dans diverses rivières parmi lesquelles la Garonne. À partir des mesures effectuées chez les **individus prélevés dans la Garonne (N = 154 sur 171)**, nous avons établi une **régression linéaire** (voir Figure 2) dont l'équation de régression correspondante est :

$$y = 2 \times 10^5 \times x^{2,7636}$$

avec : y = Poids de l'individu (en kg) et x = longueur totale de l'individu (en cm).

Cette équation va nous permettre, dans la Partie II, de prédire **le poids attendu chez les silures présents dans la partie aval de la Garonne en fonction des classes de tailles** auxquelles ils appartiennent.

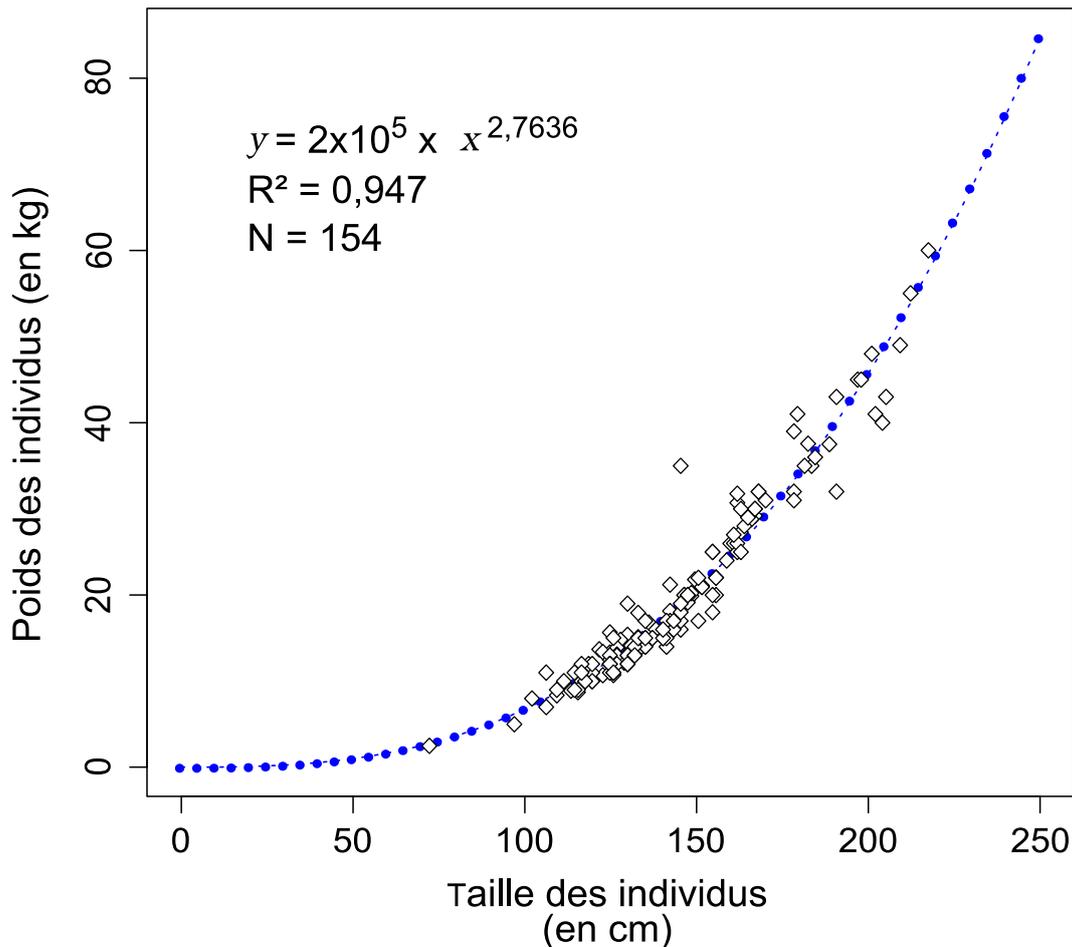


Figure 2 : Valeurs observées (losanges blancs) et valeurs prédites (points bleus) par un modèle de régression linéaire permettant d'estimer les relations entre la taille (longueur totale des individus ; en cm) et le poids (en kg) des silures de la Garonne. Cette régression a été établie à partir de mesures effectuées sur un échantillon composé de $N = 154$ individus prélevés dans la Garonne (Boulêtreau & Santoul, 2016). La formule de la régression est reportée sur la Figure, ainsi que la valeur de R^2 . Le R^2 est un paramètre qui varie entre 0 et 1 et qui indique la qualité de la prédiction d'une régression élaborée à partir d'un modèle linéaire. Une valeur proche de 0 indique que la qualité prédictive du modèle est faible, alors qu'une valeur proche de 1 indique que les prédictions du modèle sont très bonnes.

6. Quel est le nombre de silures présents dans la partie aval de la Garonne ?

Dans une étude précédente (Paz-Vinas & Santoul, 2018) financée par l' UFBAG (Union des Fédérations pour la pêche et la protection du milieu aquatique du Bassin Adour-Garonne) avec le concours de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, **nous avons estimé les effectifs de silure présents dans des grands cours d'eau comme** la Dordogne, le Tarn, le Lot et **la Garonne** (en distinguant l'aval et l'amont de la Garonne et en prenant comme référence la centrale hydroélectrique de Golfech pour distinguer l'aval de l'amont).

Dans cette étude, nous avons d'abord conduit une analyse démographique du silure basée sur les données de suivi hydrobiologique de l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB), afin de comprendre quelle a été l'évolution géographique et démographique du silure dans le bassin de la Garonne depuis son introduction (Paz-Vinas & Santoul, 2018). Ensuite, nous avons créé et analysé une base de données génétiques concernant 18 populations

échantillonnées dans la Garonne, la Dordogne, le Lot et le Tarn, afin de caractériser la diversité et la structuration génétique du silure dans ces rivières. Finalement, nous avons mis en place une approche méthodologique permettant d'estimer les abondances et les densités de silure dans les quatre rivières considérées à partir de nos données génétiques, tout en prenant en compte les divers résultats obtenus à partir de nos analyses démographiques et génétiques.

Ainsi, nous avons estimé que **le nombre total de silures dans la partie aval de la Garonne est de 43 630 individus** (toutes tailles confondues), avec un **intervalle de confiance allant de 26 242 à 78 760 individus**. Cette donnée, combinée aux résultats obtenus lors des calculs intermédiaires menés dans la Partie II de ce rapport (calcul intermédiaire A, voir Partie II) nous permettra par la suite d'estimer le nombre total d'individus présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille (calcul intermédiaire B, voir Partie II).

7. Quelle est la structure de tailles corporelles des individus composant la population de silures de la partie aval de la Garonne ?

Il est important de connaître la structure et la distribution des tailles de corps d'une population pour pouvoir réaliser toute estimation relative à la quantité de biomasse consommée par celle-ci. En règle générale, chez les poissons d'eau douce, un petit individu consomme moins de biomasse par rapport à un grand individu. Cependant, l'ensemble des petits individus d'une population de poissons peuvent consommer beaucoup plus de biomasse que l'ensemble des plus gros individus de cette même population, si les premiers sont beaucoup plus abondants que les derniers (ce qui est souvent le cas chez les organismes aquatiques ; Arranz Urgell, 2017; Sheldon, Prakash, & Sutcliffe, 1972).

En ce qui concerne la présente étude, les petits individus de silure ne peuvent pas consommer des migrateurs adultes, étant donné la taille de ces derniers lorsqu'ils réalisent leur migration de la mer aux rivières pour frayer. Par contre, **les silures ayant atteint une certaine taille seuil minimale** (voir question n°4) **sont eux susceptibles de consommer des migrateurs adultes**. Étant donné que les estimations des effectifs obtenues lors de l'étude ayant servi à répondre à la question n°6 (Paz-Vinas & Santoul, 2018) concernent la totalité de la population (toutes tailles confondues), il est nécessaire de connaître **la distribution des tailles des individus dans la population de silures** dans la partie aval de la Garonne, afin de pouvoir estimer de la façon la plus précise possible **le nombre total d'individus présents** dans cette partie de la rivière **en fonction de leur taille** corporelle (calcul intermédiaire B dans la Partie II). En estimant aussi le **poids de chaque silure en fonction de sa taille** (à partir de la régression linéaire de type « **relation Taille / Poids** » spécifique à la population de silures de la Garonne présenté en Figure 2), il nous sera possible d'**estimer la biomasse totale de silures** dans cette population **pour chaque classe de tailles** (calcul intermédiaire C, voir Partie II). Ceci nous permettra ensuite d'**estimer la biomasse totale de silures pouvant potentiellement consommer des migrateurs anadromes** (en considérant **les tailles seuil minimales de silures** susceptibles de consommer des migrateurs anadromes obtenues grâce aux réponses à la question n°4, voir calcul D en Partie II).

Dans un grand milieu ouvert comme celui de la Garonne, il est **impossible de déterminer directement la distribution exacte des tailles des individus de la population**

totale de silures, étant donné qu'il est techniquement impossible d'échantillonner et de mesurer tous les individus présents dans la rivière. Il est toutefois **possible d'approximer cette distribution**, en échantillonnant et **en mesurant un grand nombre d'individus** dans plusieurs localités différentes ; ceci en utilisant des techniques d'échantillonnage différentes (afin de ne pas favoriser une classe de tailles par rapport à une autre).

Ainsi, nous avons utilisé dans cette étude les **mesures de taille corporelles** (à savoir, la longueur totale : de l'extrémité de la tête à l'extrémité de la queue) effectuées chez les silures ayant été échantillonnés lors de l'étude qui nous a permis d'estimer les effectifs de silure dans les quatre cours d'eau principaux du bassin de la Garonne : la Garonne, la Dordogne, le Lot et le Tarn (Paz-Vinas & Santoul, 2018 ; voir question n°6 ici-haut). Plusieurs acteurs avaient contribué à cet échantillonnage, qui s'est étalé de 2016 à 2018 pour la partie aval de la Garonne. Ainsi, certains échantillons ont été prélevés par des pêcheurs professionnels, d'autres par des pêcheurs à la ligne amateurs ou par l'association MIGADO (Migrateurs Garonne Dordogne ; cf. Table 1 pour plus de détails concernant cet échantillonnage).

Table 1 : Tableau récapitulatif des différents sites d'échantillonnage avec leur origine, l'année de prélèvement, la localisation du site, ainsi que le nombre d'individus capturés et mesurés (N_{ECH}).

Année	Site	Origine des échantillons	Longitude	Latitude	N_{ECH}
2016	Bassens	Pêcheurs professionnels	N 44°89'37,4"	O -0°60'92,9"	30
2016	Saint-Jean / Bouliac	Pêcheurs professionnels	N 44°83'09,3"	O -0°55'05,8"	30
2016-2017	Isle-Saint-Georges / Cambes	Pêcheurs professionnels	N 44°73'18,3"	O -0°47'14,4"	50
2016-2017	Barsac	Pêcheurs professionnels	N 44°60'82,6"	O -0°30'41,1"	54
2016-2017	Langon	Pêcheurs professionnels	N 44°55'78,2"	O -0°24'44,9"	56
2017	Agen	Pêcheurs à la ligne	N 44°20'78,3"	E 0°60'55,7"	9
2016-2017	Golfech	MIGADO	N 44°10'54,9"	E 0°83'90,8"	63

Au total, **292 individus ont été échantillonnés et mesurés sur 7 sites d'échantillonnage différents** situés dans la partie aval de la Garonne. La Figure 3 représente la distribution spatiale de ces sites d'échantillonnage.

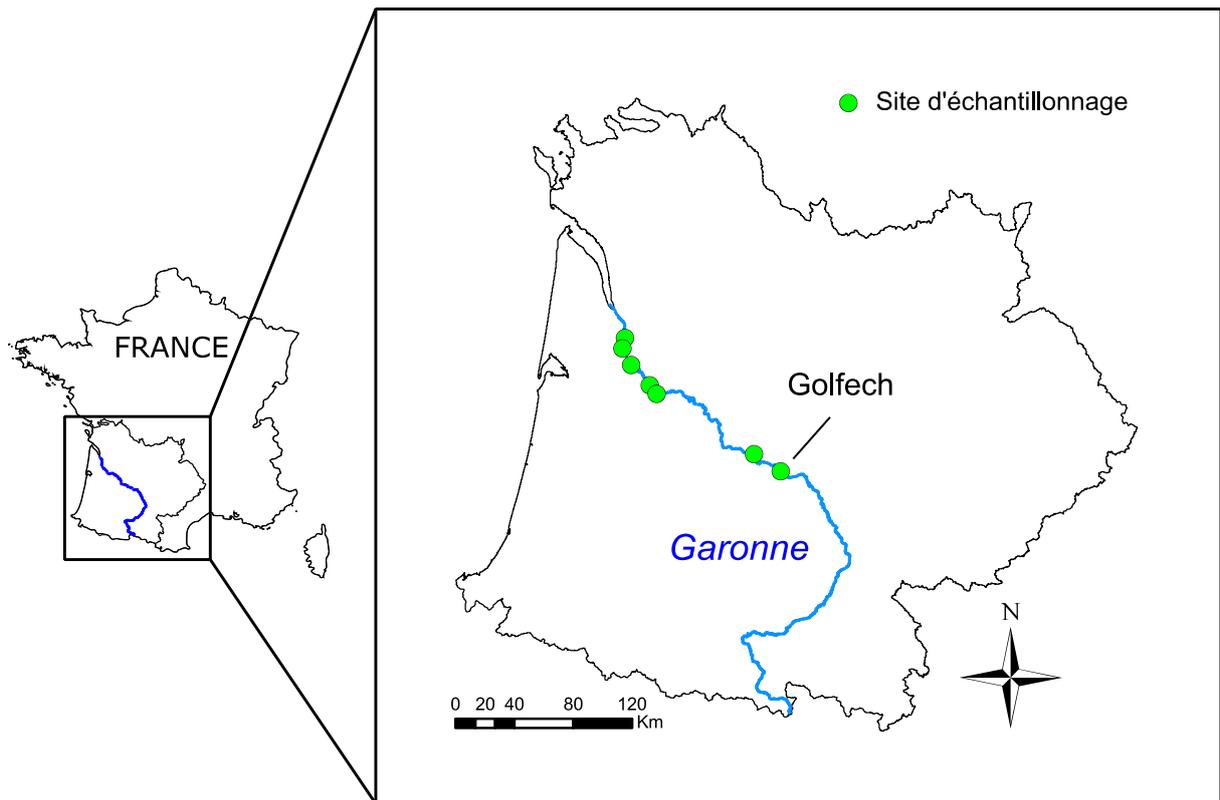


Figure 3 : Carte du Sud-ouest de la France représentant les sept sites d'échantillonnage (points verts) situés dans la partie aval de la Garonne (partie allant de l'embouchure jusqu'à l'aval de la centrale de Golfech).

La Figure 4 représente graphiquement la distribution des tailles corporelles des 292 individus échantillonnés lors de cette étude génétique. Dans la Partie II de ce rapport, nous utiliserons ces données brutes pour **estimer le nombre total de silures dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille corporelle en utilisant deux méthodes** différentes :

(i) soit en **estimant les pourcentages d'individus dans notre échantillon pour chaque classe de tailles**, pourcentages qui seront par la suite **extrapolés à la totalité de la population** de l'aval de la Garonne (en considérant que notre échantillon est représentatif de la totalité de la population ; **méthode dite « par extrapolation »**),

(ii) soit en **modélisant le spectre de tailles corporelles** (Sheldon et al., 1972) de la population de silures de la partie aval de la Garonne à **partir des données brutes mesurées** pour les 292 échantillons en utilisant la méthode dite « Llin » (pour « log-linear » ; méthode dite « **par modélisation** » ; Edwards et al., 2017; Daan et al., 2005).

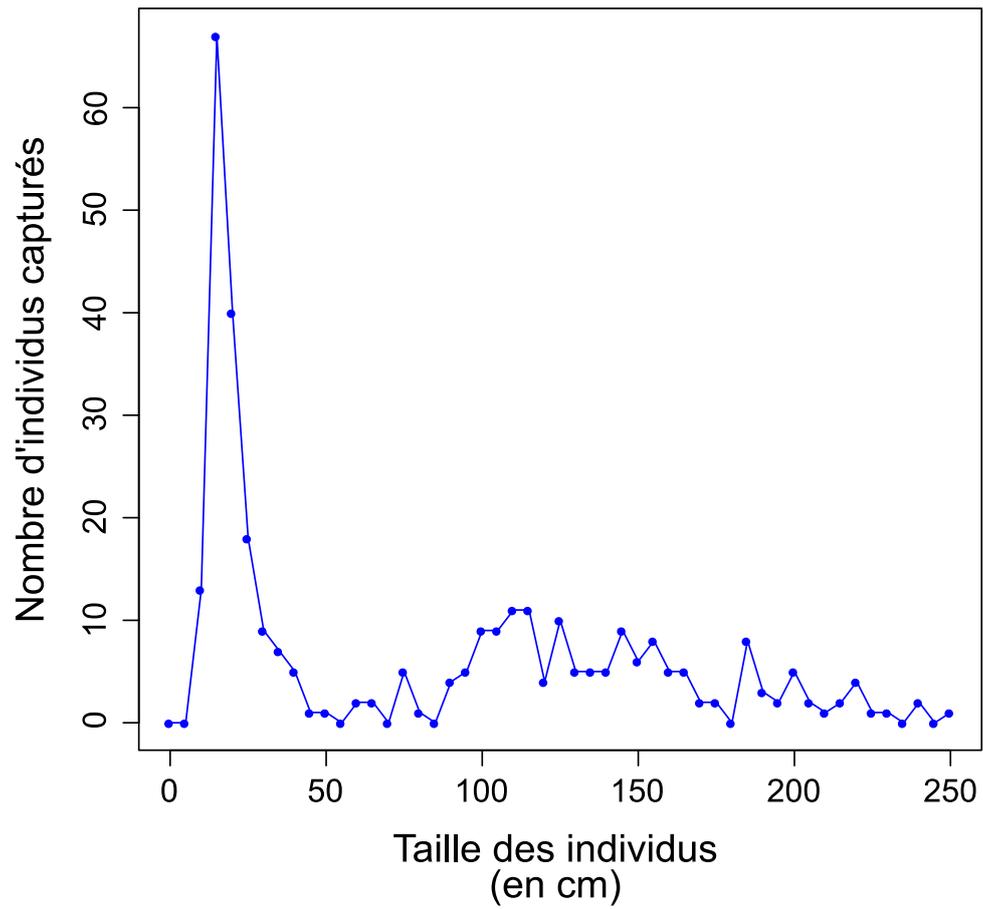


Figure 4 : Nombre de silures capturés et mesurés ($N_{total}=292$) dans la partie aval de la Garonne lors d'une étude génétique précédente (Paz-Vinas & Santoul, 2018) en fonction de leur taille corporelle (longueur totale).

PARTIE II : ESTIMATION DE LA BIOMASSE DE MIGRATEURS ANADROMES CONSOMMÉE ANNUELLEMENT PAR LES SILURES DANS LA PARTIE AVAL DE LA GARONNE.

Grâce à toutes les réponses obtenues pour les questions n° 1 à 7 présentées lors de la Partie I de ce rapport, nous avons pu effectuer tous les calculs intermédiaires nécessaires à **l'estimation de la quantité de biomasse de migrateurs anadromes consommée annuellement par les silures dans la partie aval de la Garonne**. La Figure 5 synthétise de façon schématique les résultats obtenus pour chacune des 7 questions, ainsi que les 4 étapes de calcul intermédiaires (étapes A à D dans la Figure 5) nécessaires au calcul de notre objectif, à savoir la **biomasse d'origine marine consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne** (réponse à la question n°8 de la Figure 1 ; voir aussi Figure 5 ci-dessous).

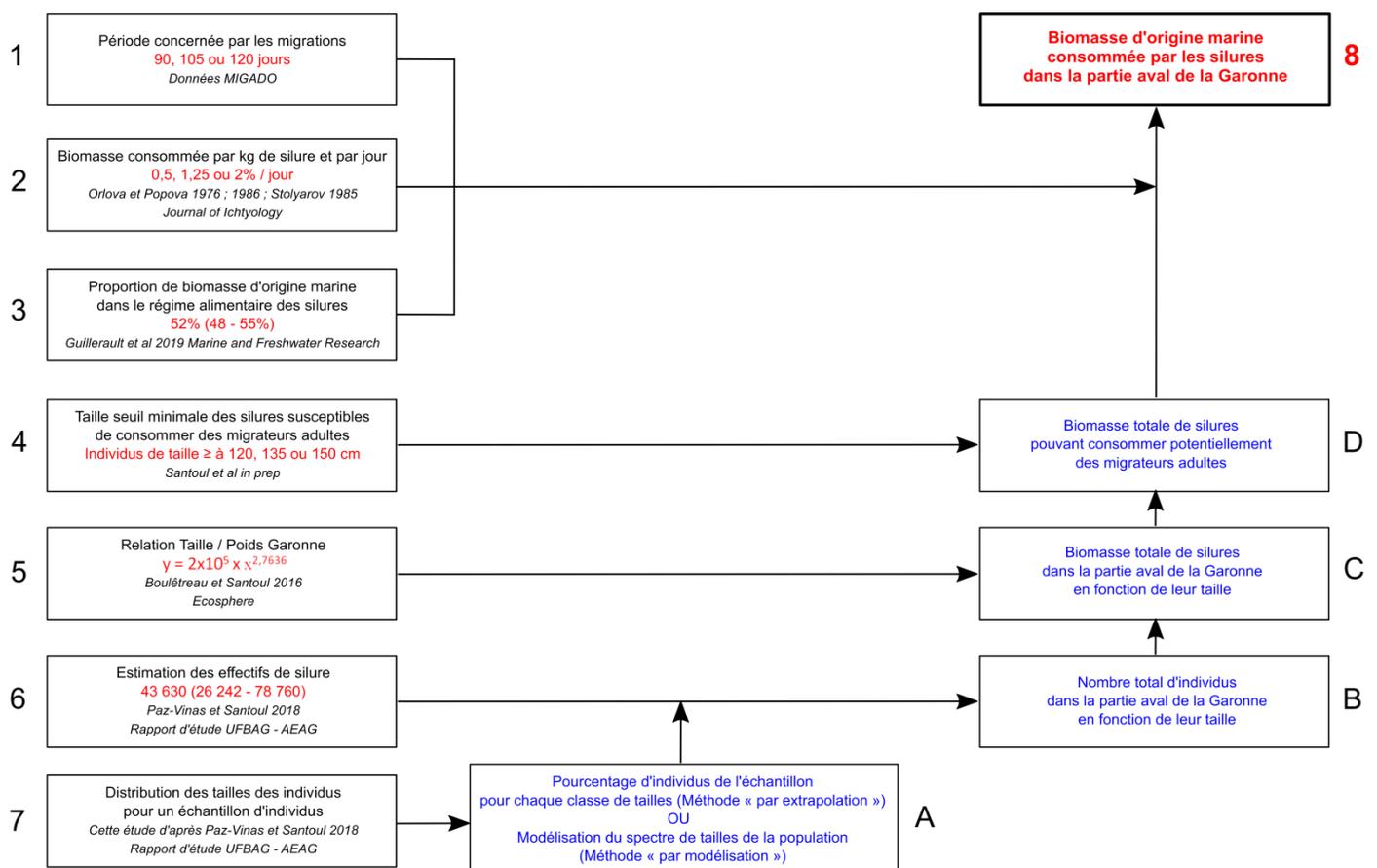


Figure 5 : Représentation schématique des différentes étapes nécessaires à l'estimation de la biomasse totale d'origine marine (et donc, de migrateurs anadromes) consommée annuellement par la population de silures de la partie aval de la Garonne (réponse à la question n°8). Les points 1 à 7 correspondent aux réponses obtenues lors des questions n° 1 à 7 (voir Partie I). Les points allant de A à D, représentées en bleu, correspondent à des étapes de calcul intermédiaires nécessaires au calcul de la biomasse totale d'origine marine consommée annuellement par la population de silures de la partie aval de la Garonne (point 8).

À ce stade du rapport, et avant de détailler nos calculs, il est important de signaler au lecteur que **les estimations que nous fournissons ici auront des intervalles de confiance très larges, et devront être interprétées avec précaution**. En effet, nos calculs vont prendre en compte tous les intervalles de confiance et couples de valeurs maximales/minimales définis pour chacun des divers paramètres d'intérêt estimés lors de diverses études précédentes ayant permis de répondre aux questions n° 1 à 7 (voir Partie I et, notamment, la Figure 5).

Ceci va nous permettre d'encadrer les **incertitudes liées à chaque méthodologie et raisonnement utilisés lors des études précédentes.**

Nous fournirons donc, au final, des tableaux reportant un **ensemble d'estimations de biomasse de migrateurs anadromes consommée annuellement par le silure**, qui seront calculées en fonction des diverses combinaisons de valeurs de paramètres d'intérêt possibles (résumées dans la Table 2 ci-dessous). **Nous distinguerons ainsi trois valeurs en particulier** dans ces tableaux, à savoir :

- **l'estimation minimale**, qui sera obtenue en prenant en compte toutes les valeurs minimales considérées pour chacun des paramètres d'intérêt (cf. Table 2 ci-dessous),
- **l'estimation la plus vraisemblable**, qui sera obtenue en prenant en compte toutes les valeurs estimées, moyennes et/ou vraisemblables considérées pour chacun des paramètres d'intérêt (Table 2),
- **l'estimation maximale**, qui sera obtenue en prenant en compte toutes les valeurs maximales obtenues pour chacun des paramètres considérés (Table 2).

Table 2 : Tableau récapitulatif des valeurs minimales, des valeurs estimées (ou moyennes ou vraisemblables selon la méthodologie ayant été utilisée pour les obtenir) et des valeurs maximales relatives à chaque paramètre considéré dans nos calculs. La question associée à chaque paramètre est aussi indiquée. Veuillez vous référer à la Figure 5 et à la Partie I pour plus de détails concernant l'obtention de ces valeurs.

Paramètre	Question associée	Valeur minimale	Valeur estimée / moyenne / vraisemblable	Valeur maximale
Période concernée (Nombre de jours)	1	90	105	120
Biomasse consommée par kg de silure	2	0,5%	1,25%	2%
Proportion de proies marines dans le régime	3	48%	52%	55%
Taille minimale des silures concernés	4	Individus \geq 150 cm	Individus \geq 135 cm	Individus \geq 120 cm
Nombre total de silures	6	26 242	43 630	78 760

Nos **estimations de la quantité de biomasse de migrateurs anadromes consommée annuellement par les silures** dans la partie aval de la Garonne seront aussi **réalisées en considérant deux approches différentes** lors de l'étape de calcul intermédiaire A (Figure 5). Ainsi, pour estimer le nombre total de silures présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille, nous utiliserons **(i) une première approche basée sur l'extrapolation directe** de la distribution **des tailles observées pour un échantillon** de cette population à la **population totale** de silures (méthode dite « par extrapolation »), et **(ii) une deuxième approche basée sur la modélisation du spectre des tailles corporelles** attendu dans la population totale (méthode dite « par modélisation »). Ces deux approches sont développées ci-après.

(i) Méthode « par extrapolation »

Nous allons détailler par la suite **les étapes de calcul intermédiaires A, B, C et D** (voir Figure 5) qui nous ont permis d'estimer la biomasse de migrateurs anadromes consommée

par les silures dans la partie aval de la Garonne (réponse à la question n°8 dans la Figure 5) **en utilisant la méthode dite « par extrapolation » lors de l'étape de calcul intermédiaire A.**

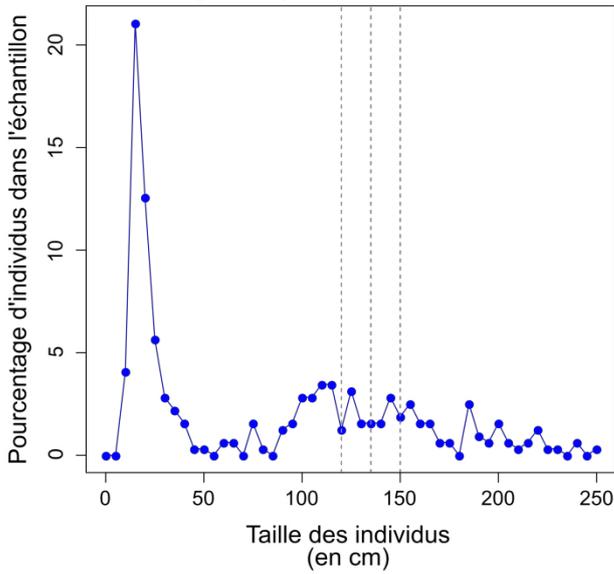
A. Pourcentage d'individus de l'échantillon pour chaque classe de tailles.

Nous avons utilisé les **données brutes concernant la distribution des tailles corporelles des 292 individus échantillonnés** lors de l'étude génétique présentée dans la Partie I (Figure 4) pour estimer le **pourcentage d'individus de l'échantillon correspondant à chaque classe de tailles** (en considérant des classes de tailles allant de 0 à 250 cm de longueur par intervalles de 5 cm). Ces pourcentages ont été calculés en utilisant la formule suivante :

$$\text{Pourcentage d'individus pour la classe de tailles } x = \frac{\text{Nombre d'individus échantillonnés appartenant à } x}{\text{Nombre total d'individus dans l'échantillon}} \times 100$$

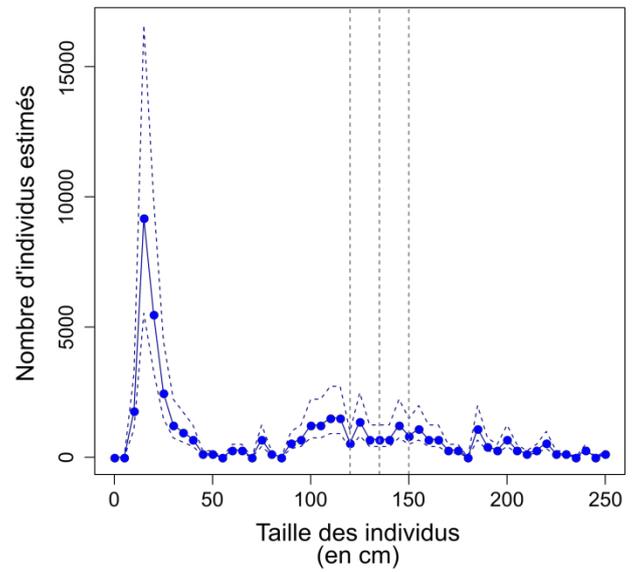
La Figure 6-A représente les pourcentages obtenus pour chaque classe de tailles à partir de cet échantillon. Ensuite, **nous posons l'hypothèse selon laquelle notre échantillon est représentatif de l'ensemble de la population de silures** de la partie aval de la Garonne et, par extrapolation, **que la distribution des pourcentages d'individus obtenus pour chaque classe de tailles à partir de notre échantillon de 292 individus est équivalente à celle caractérisant la population réelle.**

A | Pourcentage de silures échantillonnés dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille (N=292).

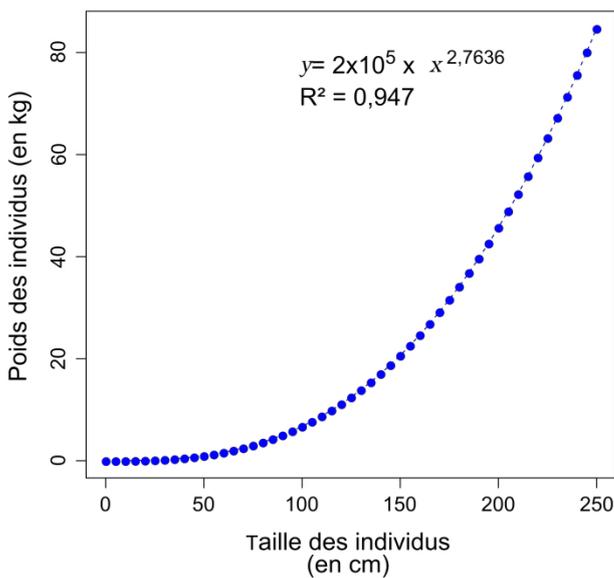


B | Stock de silures estimés dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.

x
43 630
(26 242 - 78 760)



C | Relation taille / poids chez les silures de la partie aval de la Garonne (N=154 individus).



D | Biomasse de silures estimée en fonction de la taille des individus dans la partie aval de la Garonne.

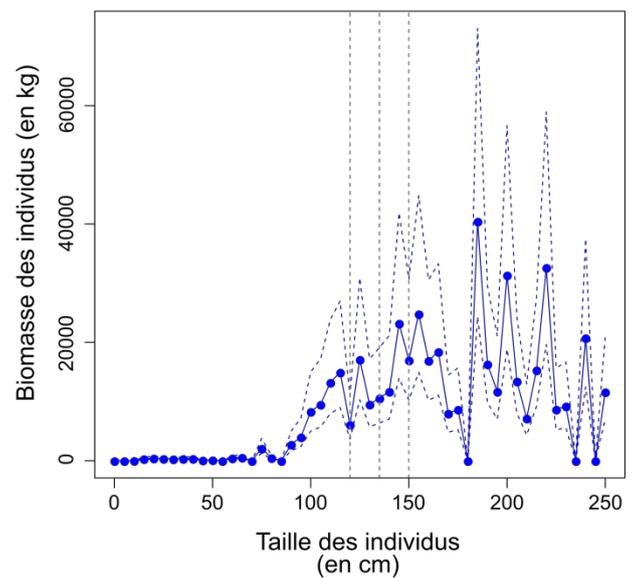


Figure 6 : Figure représentant (A) le pourcentage de silures échantillonnés dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille corporelle, (B) l'estimation du stock de silure dans la partie de la Garonne en fonction de leur taille corporelle, (C) la relation « Taille / Poids » chez les silures de la partie aval de la Garonne et (D) l'estimation de la biomasse de silures présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de la taille corporelle des individus. Les trois barres verticales grises et en pointillés dans les panels (A), (B) et (D) correspondent aux tailles seuil minimales des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes (120, 135 et 150 cm). Les courbes en pointillés bleus correspondent aux estimations obtenues en prenant en compte les valeurs minimales et maximales du nombre total de silures dans la population, alors que la courbe bleue à trait plein correspond aux estimations obtenues pour le nombre total de silures estimé.

B. Nombre total d'individus dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.

Grâce aux pourcentages calculés lors du calcul intermédiaire A, et à l'estimation des effectifs de silure dans la partie aval de la Garonne (voir question n°6, Partie I), nous avons pu déterminer **le nombre total d'individus présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.**

En effet, nous avons précédemment estimé qu'il y aurait **43 630 individus** (avec un intervalle de confiance allant de 26 242 à 78 760 individus) dans cette population, toutes tailles confondues. **Nous avons donc multiplié ces estimations par chacun des pourcentages d'individus obtenus pour chaque classe de tailles** lors de l'étape de calcul intermédiaire A, pour ainsi obtenir **le nombre total d'individus présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.** Ces résultats sont représentés dans la Figure 6-B ci-dessus.

C. Biomasse totale de silures dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.

Grâce aux résultats du calcul intermédiaire précédent (B), et à la relation « Taille / Poids » établie pour la population de silures de la Garonne (voir question n°5, Partie I et Figure 6-C), nous avons pu déterminer **la biomasse totale de silures dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.** Pour cela, nous avons d'abord prédit un poids moyen individuel pour chaque classe de tailles considérée à partir de la régression linéaire « Taille / Poids » (Figure 6-C). Nous avons ensuite multiplié (pour chaque classe de tailles) ces poids moyens individuels par le nombre total d'individus présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de la classe de tailles à laquelle ils appartiennent. Les résultats de ces calculs sont représentés dans la Figure 6-D.

D. Biomasse totale de silures pouvant consommer potentiellement des migrateurs adultes.

Nous avons utilisé les résultats du calcul intermédiaire précédent (C) et les tailles seuil minimales des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes adultes (à savoir, 120, 135 et 150 cm ; voir question n°4 et Table 2) pour **estimer la biomasse totale de silures pouvant consommer potentiellement des migrateurs adultes.** Les trois barres verticales grises et en pointillés de la Figure 6-D (représentées aussi dans 6-A et 6-B) correspondent à ces valeurs seuil minimales de taille. La Table 3 ici-bas présente la biomasse totale de silures pouvant consommer potentiellement des migrateurs adultes pour chacune des valeurs seuils minimales, et en considérant les trois estimations du nombre d'effectifs totaux dans la population présentés ici-haut (Table 2).

Table 3 : Tableau récapitulatif des valeurs de biomasse de silures pouvant consommer des migrateurs anadromes estimées en fonction du nombre total de silures dans la population et de la taille seuil minimale des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes. Le nombre total de silures supérieurs à la taille seuil minimale présents dans la population est aussi renseigné.

Nombre total de silures dans la population	Taille minimale des silures (en cm)	Nombre de silures supérieurs à la taille minimale	Biomasse des silures pouvant consommer des migrateurs anadromes (en tonnes)
26 242	120	8 087	235,111
	135	6 519	215,401
	150	4 951	188,029
43 630	120	13 446	390,896
	135	10 839	358,126
	150	8 232	312,618
78 760	120	24 272	705,637
	135	19 566	646,482
	150	14 860	564,331

Calcul final (réponse à la question n°8). Biomasse d'origine marine consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne.

Finalement, nous avons estimé lors de cette étape la **quantité de biomasse d'origine marine** (et donc, **de migrateurs anadromes**, étant donné que nous considérons toute autre source alimentaire d'origine marine dans le régime des silures comme négligeable) que les silures consomment annuellement dans la partie aval de la Garonne en fonction des divers paramètres récapitulés dans la Table 2.

Pour chaque combinaison de valeurs des paramètres « Nombre total de silures dans la population » et « Taille seuil minimale des silures » possible (voir Table 3 ci-dessus), nous avons appliqué la formule suivante :

$$\text{Biomasse d'origine marine consommée annuellement par le silure} = BS \times BS_{\text{Conso}} \times T_{\text{Mig}} \times P_{\text{Marin}}$$

avec :

- BS = Biomasse des silures pouvant consommer des migrateurs anadromes (en tonnes ; voir question n°4 et les neuf valeurs possibles reportées dans la Table 3 ci-dessus),
- BS_{Conso} = Biomasse consommée par kg de silure par jour (0,5, 1,25 ou 2% ; question n°2),
- T_{Mig} = Période concernée par les migrations en nombre de jours (90, 105 ou 120 ; question n°1),
- P_{Marin} = Proportion de proies marines dans le régime (48, 52 ou 55% ; question n°3).

Ainsi, nous avons obtenu la Table 4 ci-dessous, qui reporte **toutes les valeurs estimées de biomasse de migrateurs anadromes consommée** annuellement par les silures en fonction des diverses valeurs de paramètres susmentionnés.

Table 4 : Estimations de la quantité de biomasse de migrateurs anadromes consommée par le silure dans la partie aval de la Garonne en fonction de divers paramètres (méthode « par extrapolation »). Les valeurs en gris correspondent aux valeurs minimales, maximales et à la valeur la plus vraisemblable.

Biomasse d'origine marine totale consommée par le silure pendant la période de migration (en tonnes)			Proportion de proies marines dans le régime								
			48%			52%			55%		
			Biomasse consommée par kg de silure			Biomasse consommée par kg de silure			Biomasse consommée par kg de silure		
Taille minimale des silures concernés	Nombre total de silures (N ≥ Taille minimale)	Période concernée (Nombre de jours)	0,5%	1,25%	2%	0,5%	1,25%	2%	0,5%	1,25%	2%
≥ 150 cm	26 242 (4 951)	90	40,6	101,5	162,5	44	110	176	54,3	116,3	186,2
		105	47,4	118,5	189,5	51,3	128,3	205,3	54,3	135,7	217,2
		120	54,2	135,4	216,6	58,7	146,7	234,7	62	155,1	248,2
	43 630 (8 232)	90	67,5	168,8	270,1	73,2	182,9	292,6	77,4	193,4	309,5
		105	78,8	196,9	315,1	85,3	213,4	341,4	90,3	225,7	361,1
		120	90	225,1	360,1	97,5	243,8	390,2	103	257,9	412,7
	78 760 (14 860)	90	121,9	304,7	487,6	132,1	330,1	528,2	139,7	349,2	558,7
		105	142,2	335,5	568,8	154,1	385,2	616,2	163	407,4	651,8
		120	162,5	406,3	650,1	176,1	440,2	704,3	186,2	465,6	744,9
≥ 135 cm	26 242 (6 519)	90	46,5	116,3	186	50,4	126	201,6	53,3	133,3	213,2
		105	54,3	135,7	217,1	58,8	147	235,2	62,2	155,5	248,8
		120	62	155,1	248,1	67,2	168	268,8	71,1	177,7	284,32
	43 630 (10 839)	90	77,4	193,4	309,4	83,8	209,5	335,2	88,6	221,6	354,5
		105	90,2	225,6	361	97,8	244,4	391,1	103,4	258,5	413,6
		120	103,1	257,8	412,5	111,7	279,3	446,9	118,2	295,5	472,7
	78 760 (19 566)	90	139,6	349,1	558,6	151,3	378,2	605	160	400	640
		105	162,9	407,3	651,6	176,5	441,2	706	186,7	466,7	746,7
		120	186,2	465,5	744,7	201,7	504,3	806,8	213,3	533,3	853,4
≥ 120 cm	26 242 (8 087)	90	50,8	127	203,1	55	137,5	220,1	58,2	145,5	232,8
		105	59,2	148	237	64,2	160,5	256,7	67,9	169,7	271,6
		120	67,7	169	270,8	73,4	183,4	293,4	77,6	194	310,3
	43 630 (13 446)	90	84,4	211,1	337,7	91,5	228,8	365,9	96,7	241,9	387
		105	98,5	246,3	394	106,7	266,8	426,9	112,9	282,2	451,5
		120	112,6	281,4	450,3	122	304,9	487,8	129	322,5	516
	78 760 (24 272)	90	152,4	381	609,7	165,1	412,8	660,5	174,6	436,6	698,6
		105	177,8	444,6	711,3	192,6	481,6	770,6	203,8	509,4	815
		120	203,2	508,1	812,9	220,1	550,4	880,6	232,9	582,2	931,4

Nous avons distingué dans la Table 4 ci-dessus trois valeurs en particulier (sur fond gris), à savoir :

- **l'estimation minimale** selon la méthode « par extrapolation » (*40,6 tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an*), qui correspond à une situation extrême caractérisée (i) par une phase de **migration de courte durée** (90 jours), et (ii) par la présence dans la rivière d'un **nombre réduit de silures susceptibles de consommer des migrateurs** dans la population (4 951 individus dépassant les 150 cm) et dont les **besoins alimentaires journaliers** restent **faibles** (nécessité de consommer 0,5% de leur poids par jour, dont 48% d'origine anadrome). En d'autres termes, cette estimation considère tous les intervalles de confiance inférieurs obtenus pour chacun des paramètres d'intérêt.

- **l'estimation la plus vraisemblable** selon la méthode « par extrapolation » (*244,4 tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an*), calculée à partir des valeurs estimées les plus probables de chaque paramètre d'intérêt,

- **l'estimation maximale** selon la méthode « par extrapolation » (*931,4 tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an*), qui correspond à une situation extrême caractérisée (i) par une phase de **migration longue** (120 jours), et (ii) par la présence dans la rivière d'un **nombre très élevé de silures susceptibles de consommer des migrateurs** dans la population (24 372 individus dépassant les 120 cm) et dont les **besoins alimentaires journaliers** sont **élevés** (nécessité de consommer 2% de leur poids par jour, dont 55% d'origine anadrome). En d'autres termes, cette estimation considère tous les intervalles de confiance supérieurs obtenus pour chacun des paramètres d'intérêt.

(ii) Méthode « par modélisation » :

Pour finir, nous allons détailler les calculs que nous avons effectué pour **estimer la biomasse de migrateurs anadromes consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne** (réponse à la question n°8 dans la Figure 5) en utilisant la méthode dite « par modélisation » lors de l'étape de calcul intermédiaire A.

L'application de cette méthode alternative découle du fait que **la distribution des tailles corporelles de l'échantillon de 292 silures** utilisée lors du calcul intermédiaire A en utilisant la méthode « par extrapolation » **présente un « creux » très marqué pour des classes de tailles situées entre 25 et 100 cm**. Cela peut en effet correspondre à une réalité biologique, selon laquelle les individus appartenant à ces classes de tailles intermédiaires se retrouveraient désavantagés par rapport aux individus appartenant aux plus grandes classes de tailles (ex. prédation et compétition inter et intra-spécifique plus forte sur les silures de taille moyenne par rapport aux silures plus grands). Cependant, **ceci peut aussi être dû à des biais lors de l'échantillonnage**, qui auraient favorisé la capture de petits et de grands individus au détriment des individus de taille moyenne. Rappelons par ailleurs que cet échantillonnage n'avait pas été initialement mis en place pour déterminer la distribution des tailles de silure de la population.

Ainsi, **en modélisant le spectre de tailles corporelles du silure à partir de cet échantillon brut** (au lieu d'utiliser directement ces données brutes pour estimer le

pourcentage d'individus de la population totale par classe de tailles, comme dans la méthode précédente), **nous devrions pouvoir corriger ce manque d'information potentiel** pour les classes de tailles intermédiaires.

A. Modélisation du spectre de tailles de la population.

Ainsi, nous avons utilisé les **données brutes concernant la distribution des tailles corporelles des 292 individus échantillonnés** lors de l'étude génétique présentée dans la Partie I (Figure 4) pour modéliser le spectre de tailles de la population (Arranz Urgell, 2017; Sheldon et al., 1972). Nous avons plus particulièrement utilisé la méthode « Llin » (Daan et al., 2005; Edwards et al., 2017), qui consiste (i) à calculer le logarithme de base 2 des nombres d'individus de l'échantillon correspondant à chaque classe de tailles (en considérant des classes de tailles allant de 0 à 250 cm de longueur par intervalles de 5 cm), puis (ii) à créer un modèle linéaire représentatif de la relation entre le logarithme du nombre d'individus et la classe de tailles à laquelle ils appartiennent. La Figure 7 ci-dessous permet de visualiser ces données.

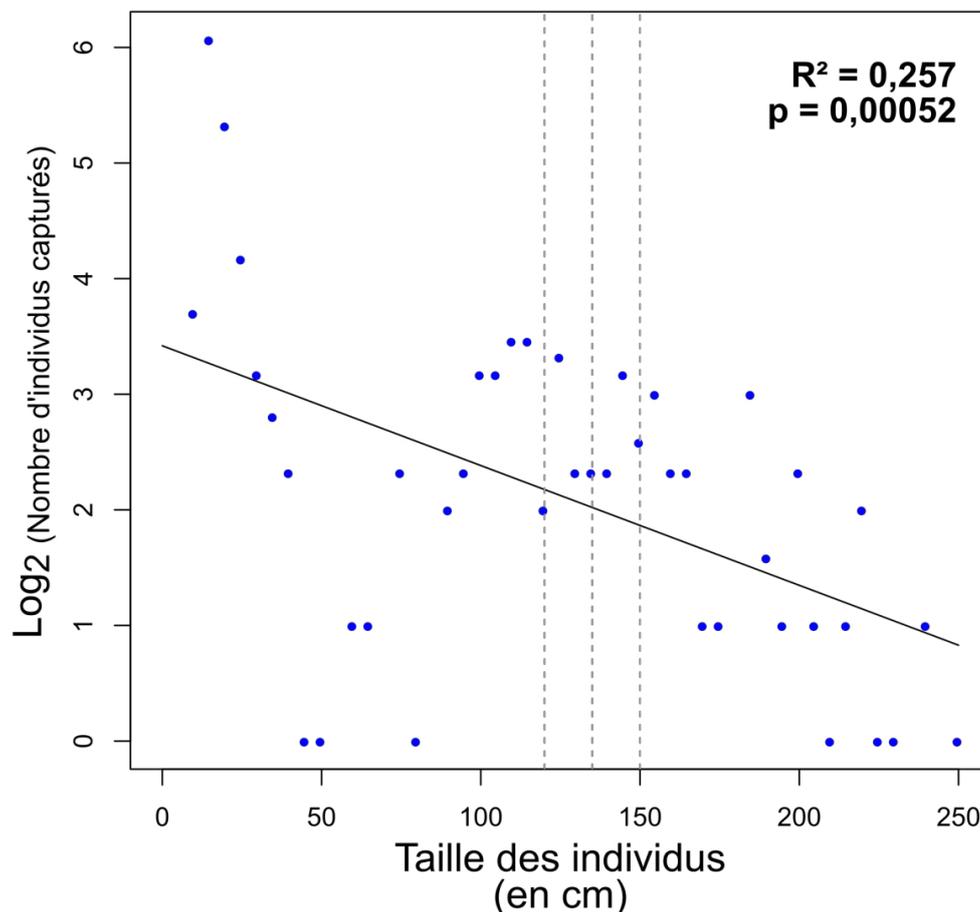
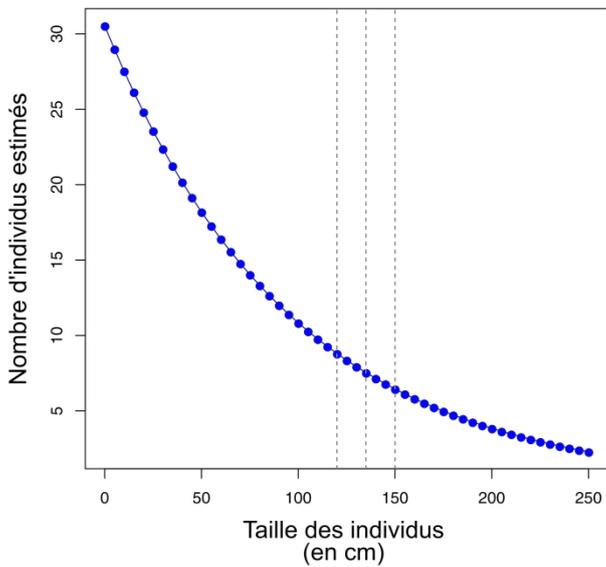


Figure 7 : Représentation graphique (i) du nombre d'individus capturés et mesurés ($N = 292$) après transformation en logarithme de base 2 (points bleus), en fonction de la classe de tailles à laquelle ils appartiennent, et (ii) de la régression linéaire obtenue avec le modèle « Llin » représentant le spectre de tailles de la population de silures (ligne pleine). La valeur de R^2 , ainsi que la valeur de p du modèle « Llin » sont retranscrites sur la Figure. Le R^2 est un paramètre qui varie entre 0 et 1 et qui indique la qualité de la prédiction d'une régression élaborée à partir d'un modèle linéaire. Une valeur proche de 0 indique que la qualité prédictive du modèle est faible, alors qu'une valeur proche de 1 indique que

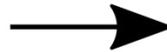
les prédictions du modèle sont très bonnes. Les trois barres verticales grises et en pointillés correspondent aux tailles seuil minimales des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes (120, 135 et 150 cm).

Finalement, nous avons transformé les valeurs logarithmiques prédites par le modèle « Llin » pour chaque classe de tailles considérée (Figure 7) en valeur décimales (voir Figure 8-A ci-dessous), puis nous avons considéré que la courbe résultante est représentative de la vraie distribution en classe de tailles de la population de silures de la partie aval de la Garonne.

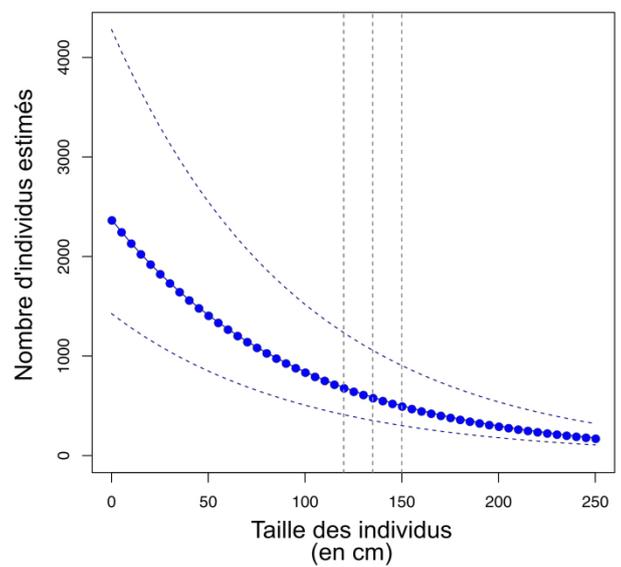
A | Nombre de silures estimés grâce à la méthode Llin dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.



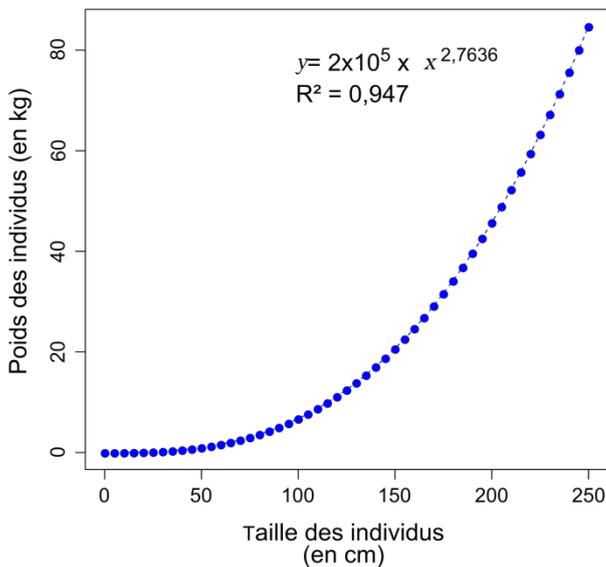
x
43 630
(26 242 - 78 760)



B | Stock de silure estimé dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.



C | Relation taille / poids chez les silures de la partie aval de la Garonne (N=154 individus).



D | Biomasse de silures estimée en fonction de la taille des individus dans la partie aval de la Garonne.

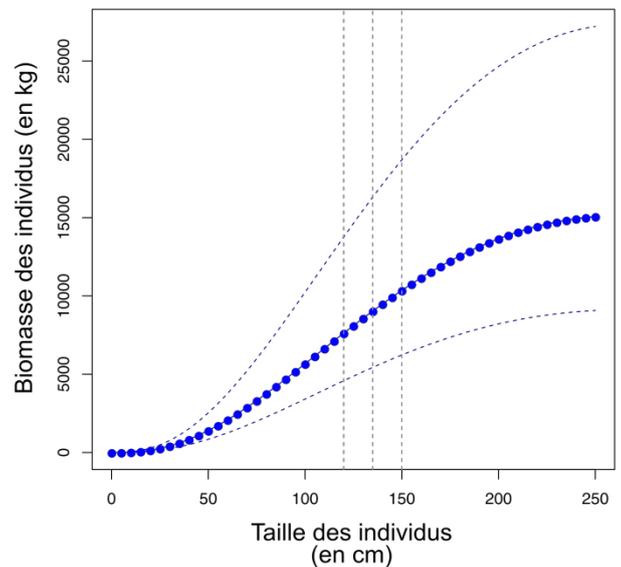


Figure 8 : Figure représentant (A) le modèle « Llin » du spectre de classes de taille construit à partir des silures échantillonnés dans la partie aval de la Garonne, (B) l'estimation du stock de silure dans la partie de la Garonne en fonction de leur taille corporelle, (C) la relation « Taille / Poids » chez les silures de la partie aval de la Garonne et (D) l'estimation de la biomasse de silures présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de la taille corporelle des individus. Les trois barres verticales grises et en pointillés dans les panels (A), (B) et (D) correspondent aux tailles seuil minimales des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes (120, 135 et 150 cm). Les courbes en pointillés bleus correspondent aux estimations obtenues en prenant en compte les valeurs minimales et maximales du nombre total de silures dans la population, alors que la courbe bleue à trait plein correspond aux estimations obtenues pour le nombre total de silures estimé.

B. Nombre total d'individus dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.

Grâce au spectre de classes de taille modélisé lors du calcul intermédiaire A, et à l'estimation des effectifs de silure dans la partie aval de la Garonne (voir question n°1, Partie I pour plus de détails), nous avons pu déterminer **le nombre total d'individus présents dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille** (en suivant le même raisonnement que celui suivi pour la méthode « par extrapolation » décrite précédemment). Ces résultats sont représentés dans la Figure 8-B.

C. Biomasse totale de silures dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille.

Grâce aux résultats du calcul intermédiaire précédent (B), et à la relation « Taille / Poids » établie pour la population de silures de la Garonne (voir question n°5, Partie I et Figure 8-C), nous avons déterminé **la biomasse totale de silures dans la partie aval de la Garonne en fonction de leur taille** (en suivant le même raisonnement que celui suivi pour la méthode « par extrapolation » décrite précédemment). Les résultats de ces calculs sont représentés dans la Figure 8-D.

D. Biomasse totale de silures pouvant consommer potentiellement des migrateurs adultes.

Nous avons utilisé les résultats du calcul intermédiaire précédent (C) et les tailles seuil minimales des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes adultes (à savoir, 120, 135 et 150 cm ; voir question n°4 et Table 2) pour **estimer la biomasse totale de silures pouvant consommer potentiellement des migrateurs adultes** (en suivant le même raisonnement que celui suivi pour la méthode « par extrapolation » décrite précédemment). La Table 5 ici-bas présente la biomasse totale de silures pouvant consommer potentiellement des migrateurs adultes pour chacune des valeurs seuils minimales considérées, et en prenant en compte les trois estimations du nombre d'effectifs totaux (à savoir, 26 242, 43 630 et 78 760, voir question n°6, Partie I).

Table 5 : Tableau récapitulant les valeurs de biomasse de silures pouvant consommer des migrateurs anadromes estimées en fonction du nombre total de silures dans la population et de la taille seuil minimale des silures susceptibles de consommer des migrateurs anadromes. Le nombre total de silures supérieurs à la taille seuil minimale présents dans la population est aussi renseigné.

Nombre total de silures dans la population	Taille minimale des silures (en cm)	Nombre de silures supérieurs à la taille minimale	Biomasse des silures pouvant consommer des migrateurs anadromes (en tonnes)
26 242	120	6 226	199,799
	135	5 436	185,183
	150	4 585	168,069
43 630	120	10 351	332,187
	135	9 037	307,885
	150	7 624	279,432
78 760	120	18 686	599,657
	135	16 313	555,787
	150	13 761	504,425

Calcul final (réponse à la question n°8). Biomasse d'origine marine consommée par les silures dans la partie aval de la Garonne.

Finalement, nous avons estimé lors de cette étape la **quantité de biomasse d'origine marine** (et donc, **de migrateurs anadromes**) **que les silures consomment annuellement dans la partie aval de la Garonne** en fonction des divers paramètres récapitulés dans la Table 2, en suivant le même raisonnement que celui suivi pour la méthode « par extrapolation » décrite précédemment.

Ainsi, nous avons obtenu la Table 6 ci-dessous, qui reporte **toutes les valeurs estimées de biomasse de migrateurs anadromes consommée** annuellement par les silures **en fonction des diverses valeurs de paramètres** susmentionnés.

Table 6 : Estimations de la quantité de biomasse de migrateurs anadromes consommée par le silure dans la partie aval de la Garonne en fonction de divers paramètres (méthode « par modélisation »). Les valeurs en gris correspondent aux valeurs minimales, maximales et à la valeur la plus vraisemblable.

Biomasse d'origine marine totale consommée par le silure pendant la période de migration (en tonnes)			Proportion de proies marines dans le régime								
			48%			52%			55%		
			Biomasse consommée par kg de silure			Biomasse consommée par kg de silure			Biomasse consommée par kg de silure		
Taille minimale des silures concernés	Nombre total de silures (N ≥ Taille minimale)	Période concernée (Nombre de jours)	0,5%	1,25%	2%	0,5%	1,25%	2%	0,5%	1,25%	2%
≥ 150 cm	26 242 (4 585)	90	36,3	90,8	145,2	39,3	98,3	157,3	41,6	104	166,4
		105	42,4	105,9	169,4	45,9	114,7	183,5	48,5	121,3	194,1
		120	48,4	121	193,6	52,4	131,1	209,8	55,5	138,7	221,9
	43 630 (7 624)	90	60,4	150,9	241,4	65,4	163,5	261,5	69,2	172,9	276,6
		105	70,4	176	281,7	76,3	190,7	305,1	80,7	201,7	322,7
		120	80,5	201,2	321,9	87,2	218	348,7	92,2	230,5	368,9
	78 760 (13 761)	90	109	272,4	435,8	118	295,1	472,1	124,8	312,1	499,4
		105	127,1	317,8	508,5	137,7	344,3	550,8	145,7	364,1	582,6
		120	145,3	363,2	581,1	157,4	393,5	629,5	166,5	416,2	665,8
≥ 135 cm	26 242 (5 436)	90	40	100	160	43,3	108,3	173,3	45,8	114,6	183,3
		105	46,7	116,7	186,7	50,6	126,4	202,2	53,5	133,7	213,9
		120	53,3	133,3	213,3	57,8	144,4	231,1	61,1	152,8	244,4
	43 630 (9 037)	90	66,5	166,3	266	72	180,1	288,2	76,2	190,5	304,8
		105	77,6	194	310,3	84,1	210,1	336,2	88,9	222,3	355,6
		120	88,7	221,7	354,7	96,1	240,2	384,2	101,6	254	406,4
	78 760 (16 313)	90	120,1	300,1	480,2	130,1	325,1	520,2	137,6	343,9	550,2
		105	140,1	350,1	560,2	151,7	379,3	606,9	160,5	401,2	641,9
		120	160,1	400,2	640,3	173,4	433,5	693,6	183,4	458,5	733,6
≥ 120 cm	26 242 (6 226)	90	43,2	107,9	172,6	46,8	116,9	187	49,5	123,6	197,8
		105	50,3	125,9	201,4	54,5	136,4	218,2	57,7	144,2	230,8
		120	57,5	143,9	230,2	62,3	155,8	249,3	65,9	164,8	263,7
	43 630 (10 351)	90	71,8	179,4	287	77,7	194,3	310,9	82,2	205,5	328,9
		105	83,7	209,3	334,8	90,7	226,7	362,7	95,9	239,8	383,7
		120	95,7	239,2	382,7	103,6	259,1	414,6	109,6	274,1	438,5
	78 760 (18 686)	90	129,5	323,8	518,1	140,3	350,8	561,3	148,4	371	593,7
		105	151,1	377,8	604,5	163,7	409,3	654,8	173,2	432,9	692,6
		120	172,7	431,8	690,8	187,1	467,7	748,4	197,9	494,7	791,5

Nous avons distingué dans la Table 6 ci-dessus trois valeurs en particulier (sur fond gris), à savoir :

- **l'estimation minimale** selon la méthode « par modélisation » (*36,3 tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an*), qui correspond à une situation extrême caractérisée (i) par une phase de **migration de courte durée** (90 jours), et (ii) par la présence dans la rivière d'un **nombre réduit de silures susceptibles de consommer des migrateurs** dans la population (4 585 individus dépassant les 150 cm) et dont les **besoins alimentaires journaliers** restent **faibles** (nécessité de consommer 0,5% de leur poids par jour, dont 48% d'origine anadrome). En d'autres termes, cette estimation considère tous les intervalles de confiance inférieurs obtenus pour chacun des paramètres d'intérêt.

- **l'estimation la plus vraisemblable** selon la méthode « par modélisation » (*210,1 tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an*), calculée à partir des valeurs les plus probables de chaque paramètre d'intérêt,

- **l'estimation maximale** selon la méthode « par modélisation » (*791,5 tonnes de migrateurs anadromes adultes consommées par le silure par an*), qui correspond à une situation extrême caractérisée (i) par une phase de **migration longue** (120 jours), et (ii) par la présence dans la rivière d'un **nombre très élevé de silures susceptibles de consommer des migrateurs** dans la population (18 686 individus dépassant les 120 cm) et dont les besoins alimentaires journaliers sont élevés (nécessité de consommer 2% de leur poids par jour, dont 55% d'origine anadrome). En d'autres termes, cette estimation considère tous les intervalles de confiance supérieurs obtenus pour chacun des paramètres d'intérêt.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

En couplant (i) les données relatives à l'estimation des effectifs de silures présents dans la partie aval de la Garonne obtenues lors d'une étude génétique précédente (ii) des connaissances obtenues au travers d'autres études scientifiques menées sur le silure dans la Garonne et (iii) des données disponibles dans la littérature scientifique, **nous fournissons dans cette étude une première estimation de la biomasse de migrateurs anadromes adultes consommés par les silures dans la partie aval de la Garonne.**

Nous avons plus particulièrement utilisé deux variantes méthodologiques différentes, avec lesquelles nous avons estimé une quantité de 244,4 [intervalle de confiance = 40,6 – 931,4] ou 210,1 [36,3 – 791,5] tonnes de migrateurs anadromes adultes consommés par le silure par an, selon la méthode considérée. Les deux variantes méthodologiques donnent des résultats comparables en termes d'ordre de grandeurs, et il est difficile de privilégier l'une par rapport à l'autre. Nonobstant, **nous suggérons de prendre plus en compte l'estimation obtenue avec la deuxième méthode** (méthode dite « par modélisation » ; estimation égale à **210,1 [36,3 – 791,5] tonnes**), étant donné que cette méthode permet de corriger un biais d'échantillonnage qui aurait potentiellement pu affecter nos calculs intermédiaires. Ce résultat suggère que le silure a un impact important sur les populations d'espèces migratrices anadromes remontant la Garonne.

Notons ici aussi que nos estimations ne concernent que la biomasse provenant de la consommation de migrateurs anadromes **adultes**. En effet, **l'impact sur les juvéniles** de ces espèces migrant de la rivière vers la mer **reste inconnu**, étant donné que ces derniers ont une signature isotopique de type « dulçaquicole » qui ne permet pas de les distinguer des autres proies dulçaquicoles potentielles du silure à partir d'analyses isotopiques (ex. celles menées par Guillerault et al, 2019 ; voir question n°3 dans la Partie I).

Ici, nous fournissons des estimations basées sur des calculs qui prennent en compte divers paramètres estimés dans plusieurs études différentes, avec des degrés d'incertitude propres à chaque étude et chaque paramètre. Les **intervalles de confiance larges que nous fournissons prennent en compte ces diverses incertitudes**. Une étude à plus large échelle, qui aurait comme objectif de réaliser toutes les étapes décrites dans ce rapport à partir d'un seul et même échantillonnage commun, pourrait permettre, dans le futur, d'affiner ces estimations pour limiter les incertitudes autour des valeurs estimées. Néanmoins, ces premières estimations devraient permettre déjà aux gestionnaires de mieux évaluer l'impact potentiel du silure sur les espèces migratrices anadromes dans la partie aval de la Garonne, et ainsi les aider à **développer des actions et des politiques adaptées à la gestion des populations silure et des espèces migratrices.**

BIBLIOGRAPHIE

- Arranz Urgell, I. (2017). *The body size structure of lake fish and its response to biotic interactions and environmental variation*. PhD thesis retrieved from <http://hdl.handle.net/10854/5151>
- Boulêtreau, S., Gaillagot, A., Carry, L., Têtard, S., De Oliveira, E., & Santoul, F. (2018). Adult Atlantic salmon have a new freshwater predator. *PLOS ONE*, *13*(4), e0196046.
- Boulêtreau, S., & Santoul, F. (2016). The end of the mythical giant catfish. *Ecosphere*, *7*(11), e01606.
- Chiarello, M., Paz-Vinas, I., Veyssièrè, C., Santoul, F., Loot, G., Ferriol, J., & Boulêtreau, S. (2019). Environmental conditions and neutral processes shape the skin microbiome of European catfish (*Silurus glanis*) populations of Southwestern France. *Environmental Microbiology Reports*, *11*(4), 605–614.
- Cucherousset, J., Horky, P., Slavík, O., Ovidio, M., Arlinghaus, R., Boulêtreau, S., ... Santoul, F. (2018). Ecology, behaviour and management of the European catfish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, *28*(1), 177–190.
- Daan, N., Gislason, H., Gope, J., & Crice, J. (2005). Changes in the North Sea fish community: evidence of indirect effects of fishing? *ICES Journal of Marine Science*, *62*(2), 177–188.
- Edwards, A. M., Robinson, J. P. W., Plank, M. J., Baum, J. K., & Blanchard, J. L. (2017). Testing and recommending methods for fitting size spectra to data. *Methods in Ecology and Evolution*, *8*(1), 57–67.
- Guillerault, N., Bouletreau, S., Iribar, A., Valentini, A., & Santoul, F. (2017). Application of DNA metabarcoding on faeces to identify European catfish *Silurus glanis* diet. *Journal of Fish Biology*, *90*(5), 2214–2219.
- Guillerault, N., Boulêtreau, S., & Santoul, F. (2019). Predation of European catfish on anadromous fish species in an anthropised area. *Marine and Freshwater Research*, *70*(5), 682.
- Orlova, E. L., & Popova, O. A. (1976). The feeding of predatory fish, the sheatfish, *Silurus glanis*, and the pike, *Esox lucius*, in the Volga Delta following regulation of the discharge of the river. *Journal of Ichthyology*, *16*, 75–87.

- Orlova, E. L., & Popova, O. A. (1987). Age related changes in feeding of catfish, *Silurus glanis*, and pike, *Esox lucius*, in the outer delta of the Volga. *Journal of Ichthyology*, 27, 54:63.
- Paz-Vinas, I., & Santoul, F. (2018). Le silure glane (*Silurus glanis* L.): connaissances et estimation des stocks dans le bassin de la Garonne. *Rapport Technique UFBAG-AEAG*, p. 1-71. http://oai.eau-adour-garonne.fr/oai-documents/61884/GED_00000003.pdf
- Sheldon, R. W., Prakash, A., & Sutcliffe, W. H. (1972). The size distribution of particles in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 17(3), 327–340.
- Stolyarov, I. A. (1985). Dietary features of catfish, *Silurus glanis*, and pike-perch *Stizostedion lucioperca*, in Kyzlyarsk Bay, northern Caspian Sea. *Journal of Ichthyology*, 25, 140–145.
- Stone, R. (2007). The last of the Leviathans. *Science*, 316(5832), 1684–1688.
- Syväranta, J., Cucherousset, J., Kopp, D., Martino, A., Céréghino, R., & Santoul, F. (2009). Contribution of anadromous fish to the diet of European catfish in a large river system. *Naturwissenschaften*, 96(5), 631–635.