

FRAI DU CORÉGONE (*COREGONUS SP.*) ET DE LA PERCHE (*PERCA FLUVIATILIS*) DANS LE LÉMAN

WHITEFISH (*COREGONUS SP.*) AND PERCH (*PERCA FLUVIATILIS*) SPAWNING IN LAKE GENEVA

CAMPAGNE 2024

PAR

Chloé GOULON^{1,2}, Marine VAUTIER^{1,2}, Isabelle DOMAIZON^{1,2}, Clément RAUTUREAU^{1,2}, Jean GUILLARD^{1,2}

¹ UNIV. SAVOIE MONT BLANC, INRAE, CARRTEL, 74200 THONON-LES-BAINS, FRANCE

² PÔLE R&D ECLA (ECOSYSTÈMES LACUSTRES), OFB – INRAE – USMB, 74200 THONON-LES-BAINS, FRANCE

RÉSUMÉ

Dans le cadre du développement d'indicateurs de l'impact du changement climatique dans le Léman, les phénologies de la reproduction de deux espèces de poissons, le corégone (*Coregonus sp.*) et la perche (*Perca fluviatilis*), sont suivies. Le suivi de la reproduction du corégone s'effectuait depuis 2016 à l'aide de filets benthiques multimapes, mais les données recueillies à partir de l'hiver 2018-2019 se sont révélées insuffisantes pour mettre en évidence des liens avec les températures. L'échantillonnage n'était en effet plus adapté à l'effectif réduit de la population de géniteurs et les conditions météorologiques défavorables impactaient la régularité du suivi. De ce fait, le suivi par pêche aux filets a été remplacé par des méthodes alternatives, non-invasives pour les poissons, testées depuis 2018 et qui ont fait leurs preuves : l'ADN environnemental (ADNe) et la caméra acoustique. L'ADNe permet de détecter la présence de poissons présents en très faible abondance, avec des contraintes de terrain limitées, et une bonne résolution spatiale au niveau de la zone d'étude. La caméra acoustique est un outil intéressant de par sa capacité à fournir des données sur une échelle temporelle plus fine tout en minimisant les contraintes sur le terrain. La phénologie de la reproduction du corégone pour l'hiver 2023-2024 est plus précoce que celle de l'année précédente et probablement en lien avec une diminution plus rapide des températures de l'eau durant cette saison. Ce suivi met également en évidence que les proxies d'activité ou d'abondance obtenus sont moins élevés que l'année précédente, laissant supposer une baisse du nombre d'individus venant se reproduire sur le site étudié. En ce qui concerne la perche, la reproduction est suivie depuis 1984, à l'aide de frayères artificielles installées chaque année sur le même site de référence, à différentes profondeurs, et de début avril jusqu'à juin. Les variabilités inter-annuelles observées dans les dynamiques de frai étaient jusqu'à présent liées principalement aux fluctuations de la température de l'eau. Pour s'adapter au décalage en profondeur de la perche, une frayère supplémentaire a été disposée en 2023 à 20 m, et en 2024, comme pour l'année précédente, l'essentiel des pontes se retrouve à cette profondeur. Le suivi de la reproduction de la perche en 2024 a été comparé à celui de 2023. La reproduction est similaire malgré un début de reproduction plus tardif qu'en 2023, probablement en lien avec la baisse de température de l'eau suite à des coups de vents.

ABSTRACT

As part of the development of climate change impact indicators in Lake Geneva, the reproductive phenologies of two fish species, whitefish (*Coregonus sp.*) and perch (*Perca fluviatilis*), are being monitored. Since 2016, whitefish reproduction has been monitored using benthic multi-mesh nets, but the data collected from winter 2018-2019 were insufficient to show a relationship with temperature. Sampling was no longer adapted to the reduced size of the spawning population and the weather conditions regularly impacted the regularity of monitoring. As a result, this gillnetting-fishing monitoring was replaced by alternative methods, non-intrusive for the fish, that has been tested since 2018 and have proved their worth: environmental DNA (eDNA) and acoustic camera. eDNA can be used to detect the presence of fish in very low abundance, with limited field constraints and good spatial resolution over the study area. The acoustic camera is an interesting tool because of its ability to provide data on a finer time scale while minimising constraints in the field. The phenology of whitefish reproduction for the winter of 2023-2024 is earlier than that of the previous year, probably linked to a more rapid fall in water temperatures during this season. This monitoring also shows that the activity or abundance proxies obtained are lower than the previous year, suggesting a drop in the number of individuals coming to breed at the studied site. In the case of perch, reproduction has been monitored since 1984, using artificial spawning grounds installed each year at the same reference site, at different depths, and from early April to June. The inter-annual variability observed in spawning dynamics has until now been linked mainly to fluctuations in water temperature. To adapt to the shift in depth of the perch, an additional spawning ground was set up in 2023 at 20 m, and in 2024, as in the previous year, most of the spawning will take place at this depth. Monitoring of perch reproduction in 2024 was compared with that in 2023. Reproduction was similar despite a later start than in 2023, probably due to the drop of the water temperature following gales.

1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Le changement climatique peut modifier la phénologie des organismes (Walther et al. 2002). Le régime thermique est en effet l'un des principaux facteurs permettant le déclenchement du frai de nombreux poissons lacustres (Gillet 1989). Chez certaines populations de poissons du Léman, des modifications dans la phénologie de la reproduction ont déjà été observées, comme pour le gardon (*Rutilus rutilus*) et la perche (*Perca fluviatilis*) (Gillet and Dubois 1995, 2007 ; Gillet and Quétin 2006 ; Concastie et al. 2019). Le déclenchement du frai de la perche et du gardon a lieu au printemps et nécessite une hausse de la température de l'eau qui doit atteindre 10 °C. A l'inverse, l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) et le corégone (*Coregonus sp.*) fraient à la fin de l'automne et au début de l'hiver lorsque les températures de l'eau descendent en dessous d'une valeur seuil d'environ 7 - 8 °C pour les deux espèces dans de nombreux lacs (Gillet 2001). L'augmentation des températures due au réchauffement climatique influence les événements saisonniers, notamment le déclenchement du frai, et pourrait influencer les valeurs seuils qui y sont associées. Avec le changement climatique, ces valeurs seuils décrites dans la littérature sont atteintes plus précocement pour les espèces « d'eau chaude » (perche et gardon), et plus tardivement pour les espèces « d'eau froide » (corégone et omble chevalier) (Desgué-Itier et al. 2023), modifiant ainsi les dates de frai pour ces espèces.

L'objectif ici est de réaliser un suivi sur le long terme de la phénologie du frai du corégone et de la perche afin d'obtenir un indicateur des conséquences du changement climatique. Plus précisément, il s'agit : 1- d'estimer la date du début/de la fin du frai, son apogée et de préciser le lien avec la température ; 2- de caractériser les géniteurs présents sur les sites de frai (taille).

Pour le corégone, les opérations tests consistant à capturer des géniteurs à l'aide de filets maillants, menées en 2015 - 2016, ont permis de confirmer la pertinence de l'étude et sa faisabilité. Au cours de la période 2016 - 2019, diverses adaptations de protocoles (type de filets, profondeur de pose) ont eu lieu afin d'augmenter les effectifs capturés et d'étudier plus finement la phénologie. Cependant, malgré les adaptations effectuées, les effectifs capturés sont restés faibles, en particulier depuis 2017 - 2018, en concordance avec la baisse constatée du stock de corégones et donc du nombre de géniteurs. Afin de pallier le faible effectif de poissons capturés, des méthodes alternatives et non-invasives ont été testées et mises en place depuis 2018 : comptage visuel, ADN environnemental (ADNe) et caméra acoustique. Ces méthodes complémentaires ayant montré leur efficacité, elles ont depuis l'hiver 2021 - 2022 totalement remplacé le suivi par pose de filets, et les résultats obtenus pour deux méthodes sélectionnées (ADNe et caméra acoustique) sont présentés dans ce rapport.

La phénologie de reproduction de la perche commune et la population de géniteurs sont suivies à l'aide de frayères artificielles mises en place chaque année à partir du mois d'avril devant le port de l'UMR CARRTEL (INRAE – USMB). Ce dispositif est mis en place depuis 1984 en suivant le protocole de Gillet et Dubois (2007). Des études antérieures ont montré que le nombre de rubans d'œufs déposés sur les frayères artificielles est un indicateur fiable du nombre de génitrices présentes dans la zone (Gillet et al. 2013). Ce dispositif a l'avantage d'attirer de nombreuses femelles et de faciliter l'observation d'un grand nombre de rubans d'œufs. En 2024, la collecte de données a pu s'effectuer dans de bonnes conditions. Les résultats sont comparés à l'année 2023.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 CORÉGONE

2.1.1 ADN environnemental (ADNe)

Depuis 2018, l'UMR CARRTEL a mis en place un suivi de la reproduction du corégone dans le Léman basé sur l'ADN environnemental (ADNe). Cette méthode a été adoptée en raison des résultats positifs obtenus, remplaçant ainsi les pêches scientifiques aux filets maillants, jugées trop dépendantes des conditions météorologiques et trop invasives. L'ADNe correspond à l'ADN libéré dans l'environnement par les organismes vivants dans un milieu donné. Cet ADN est extrait d'une matrice environnementale, ici l'eau, ce qui en fait une méthode non invasive. Elle permet d'identifier les organismes présents dans ou à proximité du milieu étudié et de quantifier l'intensité du signal ADN en lien avec le nombre d'individus et/ou leur activité biologique, comme la reproduction (par exemple, le relargage de gamètes). Pour ce suivi, une approche basée sur la PCR digitale (dPCR) a été employée. La PCR digitale offre une grande sensibilité pour détecter et quantifier des traces d'ADN même rares dans des matrices complexes comme l'eau. Elle repose sur une compartimentation de l'ADN en micro-gouttelettes indépendantes, permettant une amplification spécifique et sensible des cibles génétiques. Cette méthode, couplée à l'ADNe, s'est révélée particulièrement pertinente pour estimer l'abondance des poissons (Capo et al. 2020) et efficace pour suivre la phénologie de la reproduction du corégone dans son milieu (Vautier et al. 2023).

Le suivi ADNe a débuté en semaine 47 (20 novembre 2023), parallèlement aux autres suivis, et s'est poursuivi jusqu'au 5 février 2024, date déterminée sur la base des comptages par observation visuelle (voir les parties concernant la méthodologie des rapports des années précédentes). Les prélèvements et la filtration des échantillons d'ADNe ont été réalisés comme indiqué dans le protocole détaillé de Vautier et al. (2021), présenté dans Vautier et al. 2023 et visualisable au format vidéo (<https://www.youtube.com/watch?v=vR7ip3sdJFc>). Une fois par semaine, des échantillons d'eau de 200 mL ont été prélevés en sub-surface (10/20 cm sous la surface de l'eau) tout le long de la zone suivie depuis 2018 (Figure 1). En tout, au moins 20 sous-échantillons sont prélevés à chaque sortie, pour un volume total d'eau au moins 4 L d'eau. Les flacons, les bouteilles d'eau et tout le matériel qui sont amenés à être en contact avec l'eau prélevée ont été préalablement décontaminés au peroxyde d'hydrogène 10 % puis rincés trois fois à l'eau ultra-pure. Les prélèvements d'eau sont réalisés à heures fixes, le matin entre 10 h et 12 h, des tests ayant montré une variabilité temporelle importante du signal ADNe au cours de la journée (dégradation progressive du signal ADNe libéré durant la nuit au cours de la journée). Une fois collectée dans les bouteilles, l'eau est filtrée au travers de cartouches stériles (Sterivex de porosité 0.45 µm) dans les 2 h qui suivent le prélèvement. Les échantillons sont ensuite directement congelés, et stockés à - 80 °C jusqu'à leur analyse.

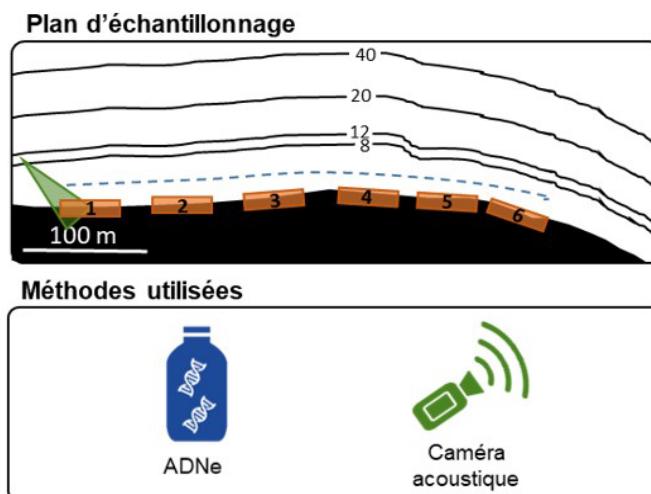


Figure 1 : Plan d'échantillonages pour le suivi de la reproduction du corégone. Triangle vert = cône théorique de la caméra acoustique. L'eau pour l'ADNe est prélevée tout le long de la zone (20 x 200 mL = ligne bleue en pointillés représentant le transect).

Figure 1 : Sampling plan for monitoring whitefish reproduction. Green triangle = theoretical acoustic camera cone. Water for eDNA is sampled all along the area (20 times 200 mL).

L'ADN est extrait des cartouches congelées en suivant le protocole détaillé dans Vautier et al. (2024a). Ce protocole utilise le kit d'extraction NucleoMag DNA/RNA Water Kit - MACHEREY NAGEL avec des adaptations spécifiques à l'utilisation des cartouches Sterivex. L'ADN est ensuite éluté dans 50 µL d'eau ultra pure et quantifié au Nanodrop (Thermo Scientific), avant d'être stocké à - 20 °C. L'ADN a ensuite été analysé en PCR digitale (dPCR) en suivant le protocole décrit dans Vautier et al. (2023). Les amorces utilisées et ciblant le corégone sont celles décrites dans Hulley et al. (2019). Les dPCR sont réalisées avec le système Bio-Rad QX600 ddPCR (Bio-Rad, Temse, Belgium) avec 4 µL d'ADNe et un volume total de 20 µL selon le protocole de Vautier et al. (2024b). Les analyses ont été faites avec le logiciel Quantasoft de Bio-Rad version 1.7.4.0917. Les résultats sont exprimés en nombre de copies d'ADN par litre d'eau filtré selon le calcul décrit dans Vautier et al. (2023).

2.1.2 Caméra acoustique

La caméra acoustique est également une méthode non-invasive de plus en plus utilisée pour le suivi des populations piscicoles et l'apport d'informations sur le comportement et la morphologie des individus (Martignac et al. 2015 ; Wei et al. 2022). Cette technologie s'appuie sur l'émission de sons à haute fréquence (de l'ordre du mégahertz, MHz). Composée de plusieurs faisceaux (nombre = 128), elle offre une résolution d'image proche d'une qualité vidéo (Belcher et al. 2001) en pénétrant l'eau sur de plus longues distances, même avec une turbidité élevée (Mueller et al. 2006). Pour l'observation de la phénologie du corégone sur le Léman, cette technologie a été utilisée (Figure 1) et le matériel employé se compose d'une caméra ARIS Explorer 3000 paramétrée à une fréquence de 1.8 MHz afin d'obtenir une zone d'échantillonnage représentant un cône dont la portée est de 16.3 m pour une largeur maximale de 8.3 m. En levant la zone proche de la caméra (range de 0 à 1.1 m) et la zone de détection au-delà de 13 m, la surface échantillonnée est d'environ 42 m². Les fréquences de l'ordre du mégahertz sont considérées comme des hautes fréquences, n'ayant pas d'influence sur le comportement des poissons (Simmonds and MacLennan 2005).

Le dispositif a été installé à l'extrême nord du site de la piscine municipale de Thonon-les-Bains et est positionné en direction de la berge (zone propice à la reproduction du corégone) (Figure 1 et 2). Le dispositif est resté en place du 29 novembre 2023 au 30 janvier 2024.

Cette technologie génère une grande quantité de données. À raison d'1 To tous les 10 jours, l'enregistrement des fichiers a été fait sur disque dur SSD de 4 To avec un remplacement régulier. Concernant la stratégie d'acquisition des données, elle a été programmée pour un enregistrement en continu avec création d'un nouveau fichier toutes les 10 minutes pour assurer une protection des données et faciliter la gestion posttraitements.

Le pré-traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel ARISFish (ver. 2.6.2 ; Sound Metrics Corp.). L'arrière-plan sur les enregistrements, composé de substrat d'objets statiques ou mobiles renvoyant un écho d'intensité inférieure à 22 cm² (Cluster Sizes, Min) a été supprimé à partir de l'algorithme adaptatif « Contiguous Samples Over Threshold » (CSOT) (Sound Metrics, 2019). Ce seuil prend en compte l'énergie minimale renvoyée par l'espèce cible (corégone). Ainsi cet algorithme permet de réduire la taille des fichiers sources en supprimant un maximum de données sans activité tout en gardant les séquences avec des corégones. Le volume de données est ainsi réduit afin d'optimiser la suite des analyses.

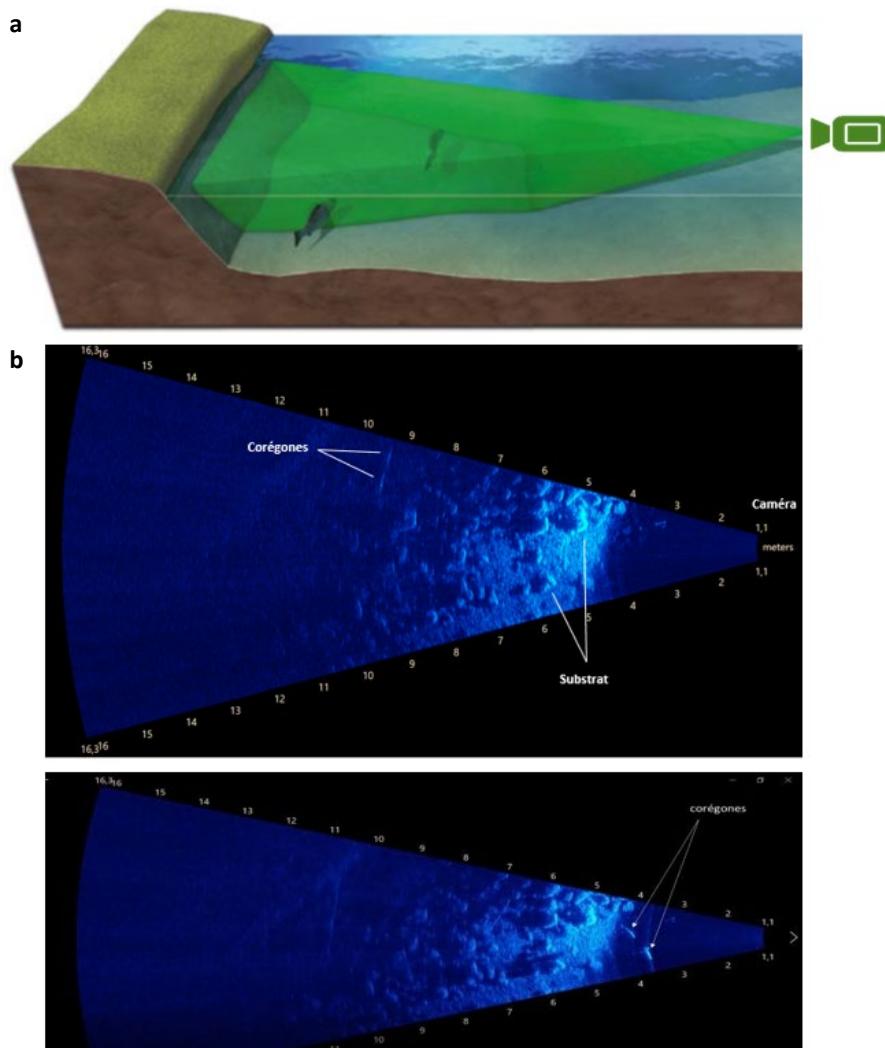


Figure 2 : a) vue 3D d'une installation type et b) du cône de détection avec la transcription de l'image acoustique sous ARISFish ; vidéo : https://www6.lyon-grenoble.inrae.fr/carrefel_fre/La-communication/Videos/Suivi-de-la-phenologie-du-corégone-Coregonus-lavaretus-sur-le-Leman-avec-la-camera-acoustique-ARIS.

Figure 2 : a) 3D view of a typical installation and b) the detection cone with the transcription of the acoustic image in ARISFish ; movie: https://www6.lyon-grenoble.inrae.fr/carrefel_fre/La-communication/Videos/Suivi-de-la-phenologie-du-corégone-Coregonus-lavaretus-sur-le-Leman-avec-la-camera-acoustique-ARIS.

Après avoir effectué le pré-traitement, le logiciel Sonar5-pro (ver. 608.32 ; Balk et Lindem, 2021) a été utilisé pour détecter automatiquement les cibles individuelles et extraire les informations (Martignac et al. 2021). En post-traitement, seuls les individus présentant les caractéristiques morphométriques similaires à celles des corégones en période de reproduction ont été sélectionnés, soit des individus de plus de 0.20 m et de moins de 0.60 m (Rogissart et al. 2023).

De plus, les données sur les deux premiers mètres et les zones contenant des échos de macrophytes et/ou des cibles présentant des signatures acoustiques visiblement différentes (brochet ou autre poisson, oiseau, plongeur) ont été aussi exclues des analyses. L'indicateur obtenu est un indicateur d'activité en nombre de détections (« track », c'est-à-dire une série d'échos de la même cible représentant ainsi un corégone) par pas de temps journalier.

2.1.3 Proxies d'abondance ou d'activités et données de températures

Pour les deux méthodes présentées dans ce rapport, la détermination du proxy d'abondance ou d'activité et la fréquence d'acquisition des données sont présentées dans le Tableau 1. Les températures moyennes journalières sont enregistrées avec des capteurs (type Tinytag ; TG-4100) positionnés à 1 m de profondeur au niveau de la caméra acoustique.

Tableau 1 : Proxies d'abondance ou d'activité utilisés dans le rapport et fréquences d'acquisition des données pour les différentes méthodes.

Table 1 : Abundance or activity proxies used in the present report and frequencies of data acquisition for the different methods.

Méthodes	Proxy d'abondance ou d'activité	Fréquence d'acquisition des données
ADNe	Concentration d'ADN environnemental (copies/L)	1 fois par semaine
Caméra acoustique	Nombre de détections (échos) par pas de temps journalier	En continu puis transformé en pas de temps journalier ou horaire

2.2 PERCHE

Afin de pouvoir suivre la phénologie de reproduction de la perche, des frayères artificielles sont mises en place chaque année en avril devant le port de l'UMR CARRTEL - INRAE, depuis 1984, suivant le protocole de Gillet et Dubois (2007) (Figure 3). Ces frayères sont constituées d'un cadre en PVC de 1 m de hauteur et 2 m de largeur, qui maintient un grillage dans lequel sont entrelacées des branches d'if commun (*Taxus baccata*). Les frayères sont stabilisées en position verticale par l'intermédiaire de flotteurs positionnés sur le haut et de poids sur le bas. À partir des années 1990, les frayères sont installées à 4 m, 8 m et 12 m de profondeur, où les perches ont l'habitude de se reproduire (Gillet and Dubois 1995). Depuis 2023, une frayère à 20 m est mise en place pour s'adapter aux changements de profondeurs observés (Concastie et al. 2019). Une ligne avec des capteurs de température (type Tinytag ; TG-4100) est mise en place dans la zone des frayères pour enregistrer les températures à 4 m, 8 m, 12 m et 20 m de profondeur. Les frayères sont relevées deux fois par semaine pour compter et mesurer les rubans d'œufs à chaque profondeur avant de les remettre à l'eau. Chaque femelle pond des œufs sous forme d'un ruban unique (Thorpe 1977) dont la longueur et la largeur sont proportionnelles à sa taille (Gillet et al. 1995 ; Dubois et al. 1996). La profondeur de la frayère est vérifiée avant et après chaque relève à l'aide d'un sondeur à main Plastimo ECHOTEST II.

Pour les deux espèces, le début et la fin du frai sont estimés lorsque les seuils de 5 % et 95 % des effectifs observés cumulés (géniteurs ou rubans d'œufs) sont atteints.



Figure 3 : Disposition théorique des frayères artificielles (rose) à différentes profondeurs (- 4, - 8, - 12 et - 20 m) et de la ligne de capteurs thermiques (jaune) à proximité du port de l'UMR CARRTEL (INRAE-USMB).

Figure 3 : Theoretical layout of artificial spawning grounds (pink) at different depths (- 4, - 8, - 12 and - 20 m) and lines of thermal sensors (yellow) near the port of UMR CARRTEL (INRAE-USMB).

3. RÉSULTATS

3.1 CORÉGONE

3.1.1 Proxies d'abondance ou d'activité

Les échantillonnages et observations ont été réalisés régulièrement, au moins une fois par semaine, tout au long de la saison de reproduction. Les variations des proxies d'abondance et d'activité sont présentées dans le Tableau 2 pour les périodes 2023 - 2024 et 2022 - 2023. Une diminution globale des indices d'abondance et d'activité est observée pour l'hiver 2023 - 2024 par rapport à l'hiver précédent. Cette baisse pourrait refléter une diminution du nombre de géniteurs présents dans la zone étudiée.

Tableau 2 : Proxies d'abondance ou d'activité pour les deux méthodes utilisées sur l'ensemble de la période de reproduction pour les deux dernières années.

Table 2 : Abundance or activity proxies for methods that cover the entire breeding period for the past two years.

Méthodes	Proxy d'abondance ou d'activité	Proxy d'abondance ou d'activité
	2022 - 2023	2023 - 2024
ADNe	43 450 copies/L d'eau filtrée sur 11 dates	14 574 copies/L d'eau filtrée sur 12 dates
Caméra acoustique	14 994 échos sur 43 jours d'acquisition (soit 349 échos/jour)	11 827 échos sur 63 jours d'acquisition (soit 188 échos/jour)

3.1.2 Dynamiques intra-saisonnieres observées en 2023 - 2024

Les dynamiques des proxies obtenus par ADNe et caméra acoustique sont présentées en Figure 4. Les deux méthodes montrent des tendances similaires au cours de la saison. Une augmentation des indices d'abondance et d'activité est observée entre le 13 et le 21 décembre (semaines 50 et 51), atteignant un pic la semaine du 18 décembre (semaine 51). À partir de la semaine du 22 décembre (semaine 51), une diminution progressive est observée, jusqu'à l'arrêt complet des activités en semaine 5 (semaine du 29 janvier).

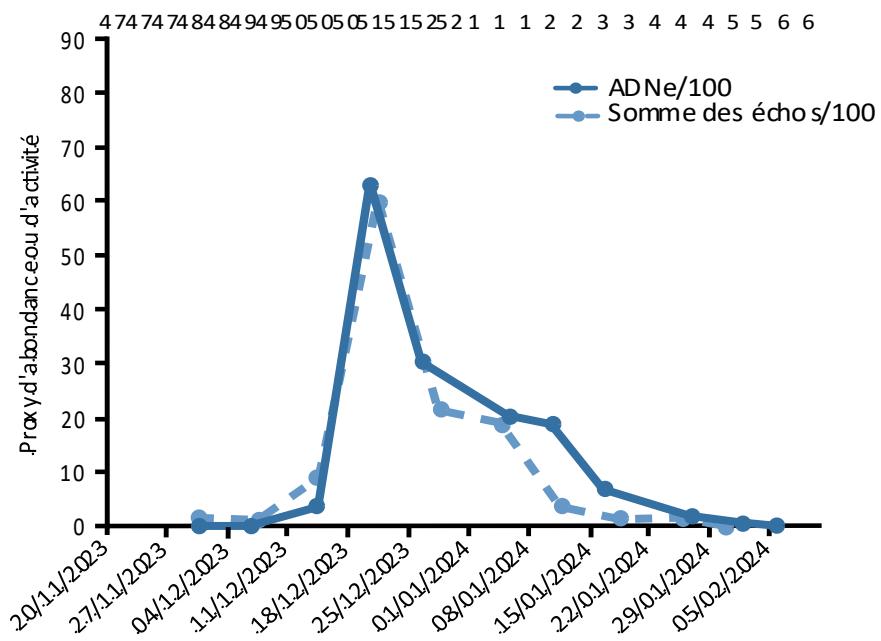


Figure 4 : Proxies d'activité obtenus pour l'ADNe (courbe bleu foncé) et pour la caméra acoustique (courbe bleu pointillée) pour la saison de reproduction 2023 - 2024. Les chiffres en haut du graphique correspondent aux numéros de semaines.

Figure 4 : Activity proxies obtained by eDNA (solid dark blue line) and acoustic camera (dotted blue line) for the 2023 - 2024 breeding season. The number at the top of the graph correspond to the week numbers.

3.1.3 Comparaison de la dynamique de reproduction avec l'année précédente

Afin de comparer les dynamiques interannuelles, les résultats obtenus par ADNe sont présentés en Figure 5. Les données issues de la caméra acoustique sont disponibles en Annexe 2. Pour l'hiver 2023 - 2024, la reproduction a débuté (5 % des effectifs) entre le 14 et le 16 décembre, soit à des dates similaires de celles observées pour l'hiver 2022 - 2023. La date correspondant à 50 % des effectifs se situe autour du 20 décembre en 2023-2024, tandis qu'elle était comprise entre le 27 décembre et le 5 janvier l'année précédente, soit un décalage de plus d'une semaine. La date correspondant à 95 % des effectifs est proche du 11 janvier pour les deux années (entre le 5 et le 11 janvier l'hiver précédent). Ainsi, bien que les dates de début et de fin soient similaires entre les deux hivers, un décalage est observé au niveau du pic de reproduction. Les résultats obtenus par caméra acoustique corroborent ce décalage interannuel (Annexe 2).

En hiver 2023 - 2024, le frai a débuté lorsque la température mesurée était proche de 9.3 °C, une valeur similaire à celle enregistrée en hiver précédent (9.5 °C). La date à laquelle 50 % des effectifs ont été atteints correspond à une température d'environ 9.2 °C, température également proche des valeurs observées durant l'hiver précédent (9.3 °C). Cependant, la dynamique reproductive semble avoir été plus précoce pour l'hiver 2023 - 2024, possiblement en lien avec une baisse rapide des températures sous 9.5 °C après le 14 décembre. Il est important de noter que lorsque la reproduction se déroule alors que les températures sont élevées en zone littorale, cela peut affecter négativement la survie embryonnaire au cours du développement (Stewart et al. 2021).

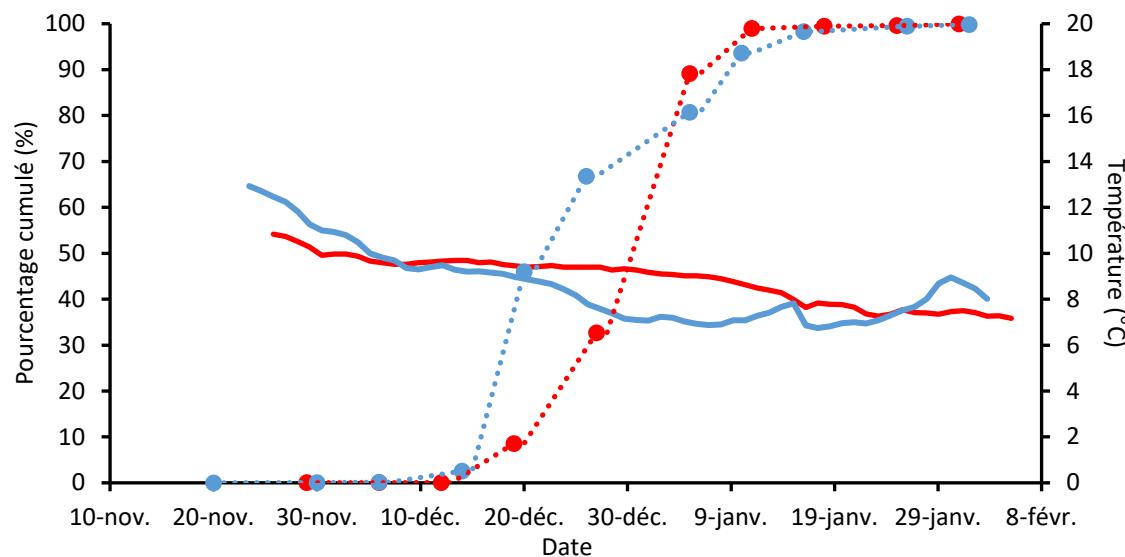


Figure 5 : Effectifs cumulés, exprimés en pourcentage, calculés à partir de l'ADNe en nombre de copies/L d'eau pour les hivers 2022 - 2023 (courbe pointillée rouge) et 2023 - 2024 (courbe pointillée bleue). Données de températures moyennes journalières mesurées à proximité du site (au niveau de la caméra acoustique, à la piscine, à 1 m de profondeur, rouge 2022 - 2023 ; bleu : 2023 - 2024).

Figure 5 : Cumulative numbers, expressed in percentage, obtained from eDNA sampling for the winters of 2022 - 2023 (dotted red line) and 2023 - 2024 (dotted blue line). Daily average temperature data measured next to the sampling site (red 2022 – 2023 ; blue: 2023 - 2024).

3.2 PERCHE

Les données de 2024 ont été comparées à celles de 2023 (Figure 6). En 2024, 18 relèves de frayères ont pu être effectuées avec 93 rubans récoltés au total. Le nombre de rubans est environ deux fois moins important que celui de l'année dernière (176 rubans) et environ 8 fois moins important qu'en 2022 (792 rubans avaient été récoltés). Le nombre de rubans est en lien avec le nombre de génitrices présentes dans la zone (Gillet et al. 2013). La baisse du nombre de rubans indique donc une baisse du nombre de génitrices dans la zone.

Au cours du temps, on constate une raréfaction de la dépôse des rubans à 4 m au profit des frayères à 8 et 12 m, en particulier depuis 2015 (Goulon et al. 2022). Ainsi en 2023, une frayère supplémentaire à 20 m de profondeur a été mise en place et comme l'année précédente, c'est à cette profondeur que la dépôse de rubans a été la plus importante (seuls 3 rubans ont été détectés aux autres profondeurs).

En 2024, on note une absence de rubans détectés à 4 m comme l'année précédente. Les investigations réalisées à l'aide d'un ROV le 23/05/2024 ont permis de confirmer l'absence de rubans déposés à 4 m de profondeur sur le site d'étude, ainsi que sur un autre site proche de la zone d'échantillonnage et sur celui de St Disdille.

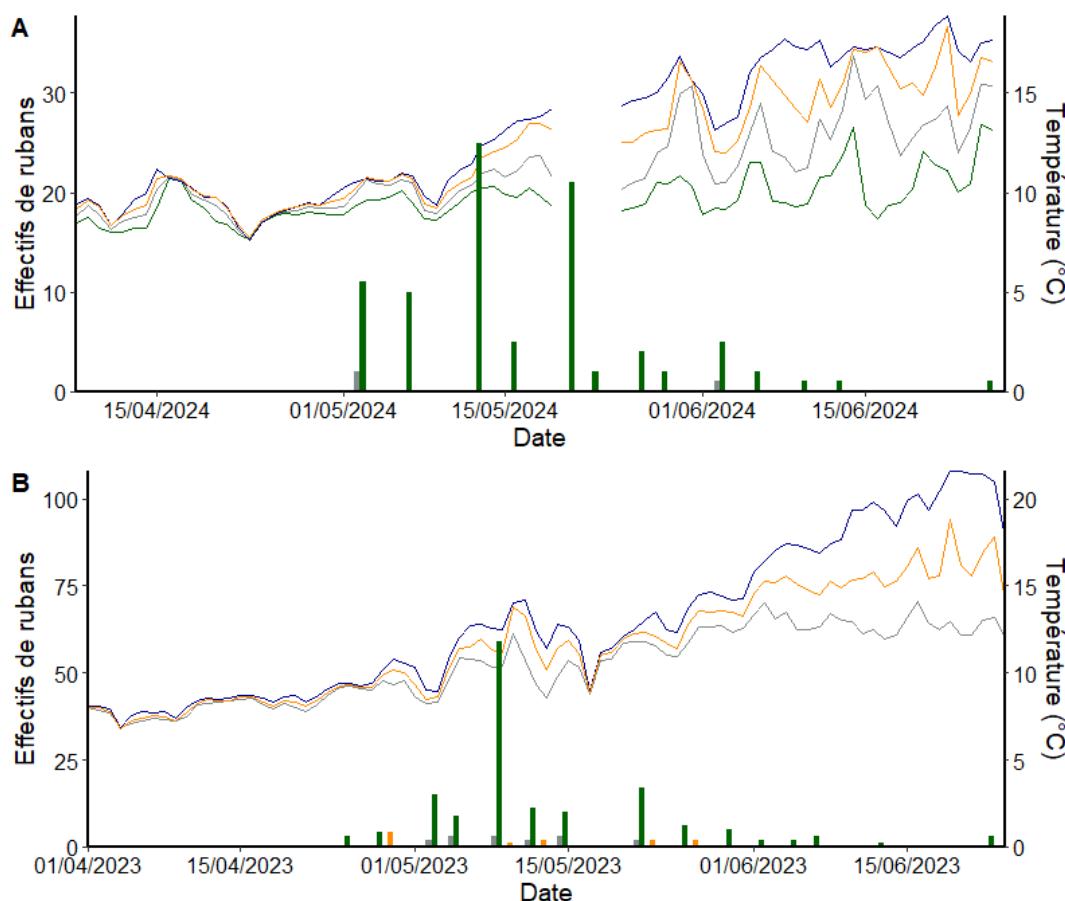


Figure 6 : Nombre de rubans de perches récoltés en a) 2024 et en b) 2023 par frayère à - 4 m (bleu), - 8 m (orange), - 12 m (gris) et - 20 m (vert). Les courbes représentent les températures relevées à - 4 m (en bleu), à - 8 m (en orange), à - 12 m (en gris) et à - 20 m (en vert) de profondeur.

Figure 6 : Number of perch ribbons harvested in a) 2024 and b) 2023 per spawning ground at - 4 m (blue), - 8 m (orange), - 12 m (grey) and - 20 m. The curves represent the temperatures recorded at - 4 m (in blue), at - 8 m (in orange), at - 12 m (in grey) and at - 20 (in green) in depth.

Le frai débute début mai en 2024 contre fin avril en 2023 pour des températures proches de 10°C (Figure 7). La dynamique de reproduction est similaire, bien que légèrement plus tardive pour 2024 avec une date d'apogée située le 9 mai en 2023 et le 14 mai en 2024 (Figure 6) ainsi qu'une date de 50 % située vers le 8 mai en 2023 et le 12 mai en 2024. La date de 95 % est la même entre les deux années soit le 2 juin.

En 2024, les températures avaient augmenté début avril puis une baisse de la température s'observe suite à des coups de vents, puis la température augmente à nouveau jusqu'à atteindre des températures de l'eau proche de celles de l'année précédente, vers fin avril. Une autre baisse des températures s'observe ensuite vers le 8 mai. Ces coups de vents en début de période de reproduction ont certainement joué un rôle dans le délai observé. L'absence de données sur la période du 20 au 24 mai s'explique par le fait que la sonde a été traînée par un pêcheur amateur, leurre s'étant retrouvé coincé dans la ligne de températures.

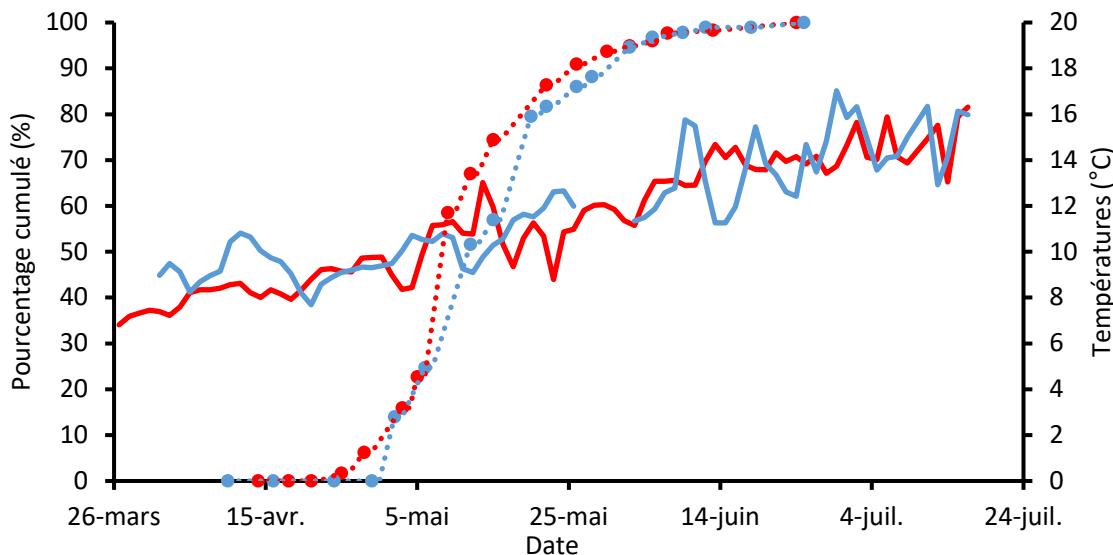


Figure 7 : Comparaison des températures moyennes (à - 8 et - 12 m de profondeur), entre 2024 (bleu) et 2023 (rouge), dynamique de frai pour l'année 2024 (bleu) et 2023 (rouge) et en effectifs cumulés de rubans, exprimés en pourcentage, récoltés sur les frayères artificielles à toutes profondeurs confondues (- 4, - 8, - 12 et - 20 m).

Figure 7 : Comparison of average temperatures (at - 8 and - 12 m depth), between 2024 (blue) and 2023 (red), spawning dynamics for the year 2024 (blue) and 2023 (red) in cumulative numbers of ribbons, expressed in percentage, collected on artificial spawning grounds at all depths (- 4, - 8, - 12, - 20 m).

La structure en taille a également une influence sur la dynamique de la reproduction. Les perches de plus petites tailles ont tendance à frayer de façon plus précoce que celles de plus grandes tailles. Cette caractéristique, combinée aux fluctuations des classes de taille, expliquerait en grande partie des variations annuelles de la date de la période de frai de la perche (Gillet et Dubois 2007). En 2023 et 2024, la différence de tailles des rubans n'est pas marquée par rapport à d'autres années, ainsi ce serait plutôt les conditions météorologiques qui expliqueraient le léger délai dans la dynamique de reproduction (Figure 8).

Comme en 2023, les rubans sont très majoritairement détectés à 20 m (97 % en 2024 et 85 % en 2023). Depuis 2004, une baisse constante du nombre de rubans à 4 m s'observe au profit de rubans déposés à 8 et 12 m (Concastie et al. 2019). Les pêcheurs constatent actuellement des rubans déposés sur les nasses jusqu'à 30 m de profondeur (Michaël Dumaz com. pers.). L'hypothèse de la hausse de transparence a été formulée pouvant induire une hausse de la prolifération d'algues filamenteuses et champignons colmatant ou dégradant les frayères (Christian Gillet com. pers.) et augmentant la vulnérabilité des perches et des rubans vis-à-vis des prédateurs (Rautureau et al. 2024). Une tentative de reconstruction des données de transparence a été faite à l'aide de données satellites, mais les algorithmes ne sont pas encore optimisés (les données obtenues par les satellites et les données mesurées en SHL2 diffèrent) (Rautureau et al. 2024).

En 2024, la dynamique de reproduction est similaire à l'année précédente bien qu'un délai dans la reproduction soit constaté en début de reproduction en raison de conditions venteuses. En 2024, le mois d'avril est le deuxième mois le plus venteux à Thonon après le mois de janvier (Annexe 5 du rapport CIPEL 2024). En 2024, les investigations par ROV ont permis de montrer que des rubans étaient majoritairement déposés à 20 m. Nous pouvons donc faire un constat : la perche se reproduit aujourd'hui dans le Léman à plus de 20 m et cela est sans doute possible en raison d'une température favorable. En effet, en dessous de 10 °C une mortalité des larves est observée (Saat and Veersalu 1996) et la perche sélectionne des eaux chaudes pour assurer la survie de la descendance (Snickars et al. 2010). La sonde de température disposée à 20 m a permis de montrer que les températures à cette profondeur sur la période de reproduction étaient en moyenne de 10 °C mais que suite à des conditions venteuses, les températures descendent sous le seuil des 10 °C à 5 reprises. La mortalité induite par ces baisses de températures de façon ponctuelle serait à investiguer dans le Léman.

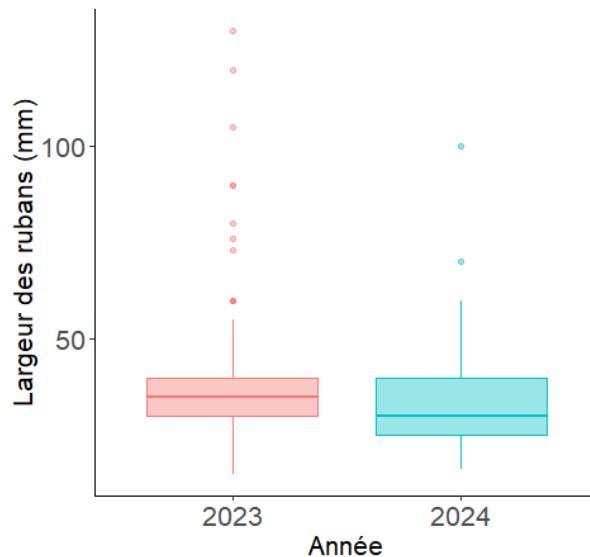


Figure 8 : Répartition en largeur des rubans collectés en 2023 (rose) et en 2024 (bleu).

Figure 8 : Distribution in width of the ribbons collected in 2023 (pink) and in 2024 (blue).

4. CONCLUSION

Concernant le suivi de la reproduction du corégone, le suivi par ADNe et par la caméra acoustique mettent en évidence une dynamique plus précoce de reproduction en 2023 - 2024 par rapport à l'année précédente, et possiblement en lien avec les températures de l'eau moins élevées mesurées en décembre. Les méthodes ont aujourd'hui été stabilisées, mais des développements sont toujours en cours avec la caméra acoustique afin de pouvoir intégrer la structure en taille qui pourrait expliquer des différences certaines années dans les dynamiques de reproduction observées. Pour l'hiver 2023 - 2024, tous les proxies d'activités obtenus sont moins élevés que l'année précédente (entre 2 et 3 fois moins importants), indiquant une baisse probable du nombre d'individus venant se reproduire sur le site de Ripaille.

Pour la perche, la dynamique de reproduction en 2024 est proche de celle de l'année précédente (2023) bien qu'un décalage soit constaté en début ainsi que vers le milieu de la reproduction en raison de conditions venteuses. Comme l'année précédente la dépôse des rubans est très majoritaire à 20 m. Le changement de profondeur sur le long terme pourrait en partie s'expliquer d'une part par la hausse des températures du lac et d'autre part par la hausse de transparence en lien avec la réoligotrophisation, certainement accentué par la présence de la moule quagga. En 2024, les explorations par robot sous-marin télécommandé (ROV) s'ajoutant aux observations des pêcheurs, vont dans le sens d'un changement de comportement de la reproduction de la perche dans le Léman, notamment une ponte à des profondeurs plus importantes.

BIBLIOGRAPHIE

- Balk H, Lindem T (2021) Sonar4 and Sonar5-Pro post processing systems: Operator manual version 606.23, 489 p. Lindem Data Acquisition, Oslo (Norway).
- Belcher, E., B. Matsuyama, and G. Trimble. 2001. Object identification with acoustic lenses. *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295)*. Proceedings of the Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Marine Technol. Soc. 6–11.
- Capo, E., G. Spong, S. Koizumi, I. Puts, F. Olajos, H. Königsson, J. Karlsson, and P. Byström. 2020. Droplet digital PCR applied to environmental DNA, a promising method to estimate fish population abundance from humic-rich aquatic ecosystems. *Environmental DNA* 3: 343–352. doi:10.1002/edn3.115
- Concastie, G., J. Guillard, and C. Goulon. 2019. Etude de la dynamique de la population et de la phénologie de la reproduction de la perche (*Perca fluviatilis*) dans le Léman. suivi halieutique Convention Cantons VD, VS, GE, OFEV.
- Desgué-Itier, O. and others. 2023. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 27: 837–859. doi:10.5194/hess27-837-2023
- Dubois, J.-P., C. Gillet, S. Bonnet, and Y. Chevalier-Weber. 1996. Correlation between the size of mature female perch (*Perca fluviatilis* L.) and the width of their egg strands in Lake Geneva. *Annales Zoologici Fennici* 33: 417–420.
- Gillet, C. 1989. Le déroulement de la fraie des principaux poissons lacustres. *Hydroécol. Appl.* 1: 117–143. doi:10.1051/hydro:1989006
- Gillet, C. 2001. Le déroulement de la fraie des principaux poissons lacustres, p. 241–282. In *Gestion piscicole des grands plans d'eau*.
- Gillet, C., and J. P. Dubois. 1995. A survey of the spawning of perch (*Perca fluviatilis*), pike (*Esox lucius*), and roach (*Rutilus rutilus*), using artificial spawning substrates in lakes. *Hydrobiologia* 300–301: 409–415. doi:10.1007/BF00024482
- Gillet, C., and J. P. Dubois. 2007. Effect of water temperature and size of females on the timing of spawning of perch *Perca fluviatilis* L. in Lake Geneva from 1984 to 2003. *Journal of Fish Biology* 70: 1001–1014. doi:10.1111/j.1095-8649.2007.01359.x
- Gillet, C., J. P. Dubois, and S. Bonnet. 1995. Influence of temperature and size of females on the timing of spawning of perch, *Perca fluviatilis*, in Lake Geneva from 1984 to 1993. *Environ Biol Fish* 42: 355–363. doi:10.1007/BF00001465
- Gillet, C., C. Lang, and J. P. Dubois. 2013. Fluctuations of perch populations in Lake Geneva from 1984 to 2011 estimated from the number and size of egg strands collected in two locations exposed to different fishing practices. *Fish Manag Ecol* 20: 484–493. doi:10.1111/fme.12037
- Gillet, C., and P. Quétin. 2006. Effect of temperature changes on the reproductive cycle of roach in Lake Geneva from 1983 to 2001. *Journal of Fish Biology* 69: 518–534. doi:10.1111/j.1095-8649.2006.01123.x
- Goulon, C., G. Concastie, F. Keck, C. Gillet, L. Espinat, and J. Guillard. 2022. Shifting perch reproduction phenology in response to climate change.
- Hulley, E. N., Tharmalingam, S., Zarnke, A., & Boreham, D. R. (2019). Development and validation of probe-based multiplex real-time PCR assays for the rapid and accurate detection of freshwater fish species. *PLoS One*, 14(1), e0210165.
- Martignac, F., Baglinière, J. L., Ombredane, D., & Guillard, J. (2021). Efficiency of automatic analyses of fish passages detected by an acoustic camera using Sonar5-Pro. *Aquatic Living Resources*, 34, 22.
- Martignac, F., A. Daroux, J.-L. Bagliniere, D. Ombredane, and J. Guillard. 2015. The use of acoustic cameras in shallow waters: new hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology. *Fish and Fisheries* 16: 486–510. doi:<https://doi.org/10.1111/faf.12071>
- Mueller, R. P., R. S. Brown, H. Hop, and L. Moulton. 2006. Video and acoustic camera techniques for studying fish under ice: a review and comparison. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*.
- Rautureau, C., C. Goulon, T. Tormos, and J. Guillard. 2024. Analyse de l'évolution du changement de comportement des perches en lien avec les paramètres environnementaux. Rapport OFB Pôle ECLA.
- Rogissart, H., C. Rautureau, F. Cattanéo, C. Goulon, F. Martignac, and J. Guillard. 2023. Phénologie de la reproduction du corégone (*Coregonus sp.*) à l'aide d'une caméra acoustique. Rapport ECLA.
- Saat, T., and A. Veersalu. 1996. The rate of early development in perch *Perca fluviatilis* L. and ruffe *Gymnocephalus cernuus* (L.) at different temperatures. *Annales Zoologici Fennici* 33: 693–698.
- Simmonds, J., and D. N. MacLennan. 2005. *Fisheries acoustics: theory and practice*, Blackwell, Oxford, UK.
- Snickars, M., G. Sundblad, A. Sandström, L. Ljunggren, U. Bergström, G. Johansson, and J. Mattila. 2010. Habitat selectivity of substrate-spawning fish: modelling requirements for the Eurasian perch *Perca fluviatilis*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 398: 235–243. doi:10.3354/meps08313
- Sound Metrics. (2019). ARISFish software user guide version 2.6.2. Bellevue, Washington, United States: Sound Metrics Corp.

- Stewart, T. R., C. Brun, J. Baer, J. Karjalainen, J. Guillard, and E. Lasne. Response of whitefish embryos to thermal conditions diverges between perialpine populations. Submitted.
- Stewart, T. R., M. Mäkinen, C. Goulon, J. Guillard, T. J. Marjomäki, E. Lasne, J. Karjalainen, and J. D. Stockwell. 2021. Influence of warming temperatures on coregonine embryogenesis within and among species. preprint Ecology.
- Thorpe, J. 1977. Synopsis of biological data on the perch *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 and *Perca flavescens* Mitchell, 1814, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Vautier, M., et al., 2021, Fish eDNA: water sampling and filtration through Sterivex filter unit, protocols.io. dx.doi.org/10.17504/protocols.io.br5rm856.
- Vautier, M., C. Chardon, C. Goulon, J. Guillard, and I. Domaizon. 2023. A quantitative eDNA-based approach to monitor fish spawning in lakes: Application to European perch and whitefish. Fisheries Research 264: 106708. doi:10.1016/j.fishres.2023.106708
- Vautier, M. C. Chardon, C. Galiegue and I. Domaizon. (2024a). eDNA extraction from water samples filtered through Sterivex filter units (NucleoMag DNA/RNA Water Kit - MACHEREY NAGEL). v1. ZappyLab, Inc. <https://doi.org/10.17504/protocols.io.ewov1qpkpgr2/v1>
- Vautier, M., Chardon, C., Galiegue, C., & Domaizon, I. (2024b). ddPCR for probes to target eDNA samples : from sample preparation to droplet reading v1. ZappyLab, Inc. <https://doi.org/10.17504/protocols.io.n92ldm479l5b/v1>
- Walther, G.-R. and others. 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature 416: 389–395. doi:10.1038/416389a
- Wei, Y., Y. Duan, and D. An. 2022. Monitoring fish using imaging sonar: Capacity, challenges and future perspective. Fish and Fisheries 23: 1347–1370. doi:10.1111/faf.12693

ANNEXES

ANNEXE 1

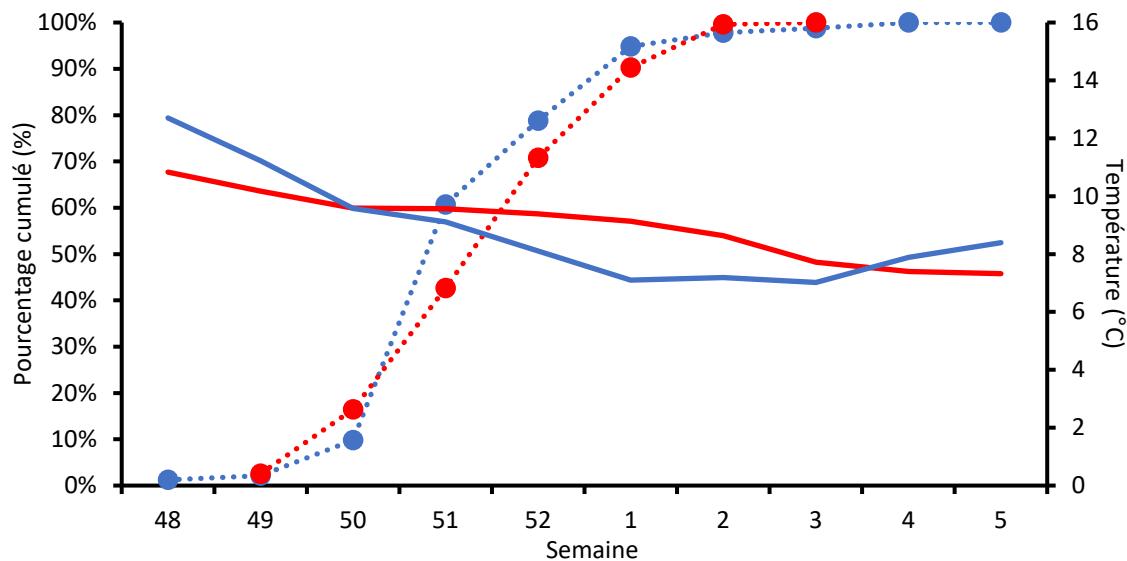


Figure 9 : Effectifs cumulés par semaine, exprimés en pourcentage, calculés à partir du nombre d'échos détecté par la caméra acoustique pour les hivers 2022 - 2023 (courbe pointillée rouge) et 2023 - 2024 (courbe pointillée bleue). Données de températures moyennes pour la semaine à proximité du site (au niveau de la caméra acoustique, à la piscine, à 1 m de profondeur, rouge 2022 - 2023 ; bleu : 2023 - 2024).

Figure 9 : Cumulative numbers per week, expressed in percentage, obtained from echos number obtained by acoustic camera for the winters of 2022 - 2023 (dotted red line) and 2023-2024 (dotted blue line). Daily average temperature data measured next to the sampling site (red 2022 – 2023 ; blue: 2023 - 2024).

ANNEXE 2

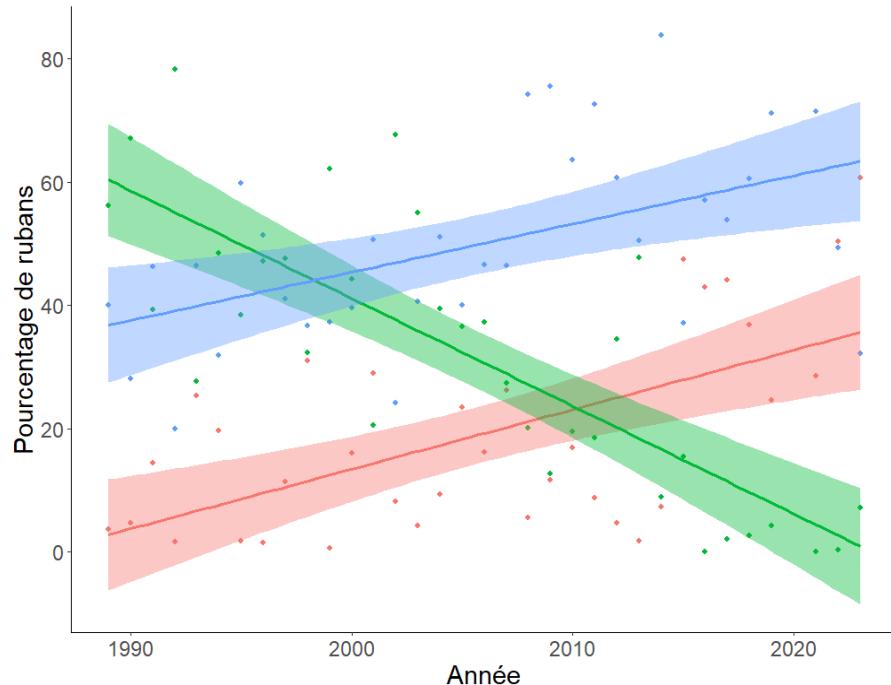


Figure 10 : Evolution du pourcentage de rubans détectés à 4 (vert), 8 (bleu) et 12 m (rouge).

Figure 10 : Percentage of ribbons detected at 4 (green), 8 (blue) and 12 m (red).