

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 2022

PAR

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

¹ UNIV. SAVOIE MONT BLANC, INRAE, CARTEL, 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 multimailles, mais les données recueillies les dernières années 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 régulièrement la régularité du suivi. De ce fait, le suivi par pêche aux filets a été remplacé par des méthodes alternatives testées depuis 2018 et qui ont fait leurs preuves : l'ADNe, les comptages visuels et la caméra acoustique. La phénologie de reproduction pour l'hiver 2021/2022 est similaire à celle de l'année précédente aussi bien en termes de températures qu'en termes de dates du pic de reproduction. Les températures mesurées sont proches de celles de l'hiver 2015/2016 qui avaient retardé la reproduction. Une différence dans les structures en taille et/ou âge pourrait contrebalancer les effets des températures élevée. Les liens entre ces facteurs biologiques et les dates de reproduction seraient à investiguer. Ce suivi met également en évidence que les proxy d'activité ou d'abondance obtenus sont plus faibles que l'année précédente (entre deux et six fois), laissant supposer une diminution 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, à partir 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. Le suivi de la reproduction de la perche en 2022 a été comparé à celui de 2021. Pour la perche, en 2022 la reproduction a débuté au même moment qu'en 2021 et elle s'est accélérée en raison d'un réchauffement plus important en mai 2022 et de la présence de reproductrices de plus petite taille.

ABSTRACT

As part of the development of indicators of the impact of climate change in Lake Geneva, the reproductive phenologies of two fish species, whitefish (*Coregonus sp.*) and perch (*Perca fluviatilis*), are monitored. The monitoring of whitefish reproduction was carried out since 2016 using benthic multi-mesh nets, but the data collected in recent years were no longer sufficient to highlight links with temperatures. 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 monitoring was replaced by alternative methods tested since 2018 and which proved to be successful: eDNA, visual counting and acoustic camera. Temperatures are close to winter 2015-2016 which resulted to a late breeding. A difference in the structures in size and/or age could offset the effects of high temperatures.

The links between these biological factors and the dates of reproduction should be investigated. Monitoring also highlight that the activities and abundance proxy obtained are lower than the previous year (between two and six times), that can be explained by a reduction in the number of individuals coming to reproduce on the study site. In order to monitor perch reproduction, since 1984, artificial spawning grounds have been set up each year at the same reference site, at different depths, from early April through June. The inter-annual variability observed in the spawning dynamics is mainly linked to fluctuations in water temperature. The monitoring of perch spawning in 2022 was compared to that of 2021. Spawning in 2022 began at the same time as in 2021 and was accelerated due to a greater warming in May 2022 and to the presence of smaller females in the breeding population.

1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Le changement climatique peut modifier la phénologie des organismes (Walther et al. 2002). Le régime thermique est en effet le principal facteur 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 pour le gardon (*Rutilus rutilus*) et pour la perche (*Perca fluviatilis*) (Gillet and Dubois 1995, 2007; Gillet and Quélin 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, le corégone (*Coregonus sp.*) et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) 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 (7-8 °C environ pour les deux espèces). Avec le changement climatique, ces valeurs seuils devraient être 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), modifiant ainsi les dates de frai pour ces espèces.

L'objectif 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 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, âge).

Pour le corégone, les opérations tests consistant à capturer les géniteurs qui furent menées en 2015/2016 ont permis de confirmer l'intérêt de l'étude et sa faisabilité. Au cours de la période 2016-2019 diverses adaptations de protocole (type de filets, profondeur de pose) ont eu lieu afin d'augmenter les effectifs et d'étudier plus finement la phénologie. Cependant, malgré les adaptations effectuées, les effectifs capturés restaient faibles, en particulier depuis 2017-2018, en lien avec la baisse constatée dans la pêche du stock et donc du nombre de géniteurs. Des méthodes alternatives ont donc été testées depuis 2018 et mises en place afin d'étudier la phénologie afin de pallier au manque d'effectifs de poissons capturés et de plus en mettant en place des méthodes non invasives : comptage visuel, ADN environnemental, caméra acoustique. Les résultats obtenus avec ces méthodes ayant fait leurs preuves, elles ont depuis l'hiver 2021/2022 totalement remplacé le suivi par pose de filets benthiques, et les résultats obtenus avec ces méthodes non-invasives sont présentées dans ce rapport.

Afin de pouvoir suivre la phénologie de reproduction de la perche et d'étudier la population de géniteurs, des frayères artificielles sont mises en place chaque année en avril devant le port de l'UMR CARTEL (INRAE – USMB), depuis 1984, 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 facilite l'observation d'un grand nombre de rubans d'œufs. En 2022, la collecte de données a pu s'effectuer dans de bonnes conditions. Les résultats sont comparés à l'année 2021.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. COREGONE

2.1.1. ADN ENVIRONMENTAL (ADNE)

Le suivi ADNe de la reproduction du corégone dans le Léman a été mis en place depuis 2018 par INRAE, et suite aux résultats positifs obtenus, cette méthode a été retenue pour suivre la phénologie de reproduction du corégone et remplace les pêches scientifiques aux filets maillants qui étaient trop dépendantes des contraintes météorologiques et étaient plus invasives. L'ADNe est l'ADN libéré dans l'environnement par les organismes vivant dans un milieu, et cet ADN libéré est extrait à partir d'une matrice environnementale, ici l'eau. Il s'agit donc d'une méthode non-invasive,

qui permet d'identifier les organismes vivant dans, ou à proximité, du milieu étudié, et de quantifier l'intensité du signal ADN libéré en lien avec le nombre d'individus et/ou leur activité de reproduction (ex : relargage de gamètes). Une approche par PCR digitale (dPCR) appliquée à l'ADNe a été employée pour le suivi de la phénologie du corégone. Il s'agit d'une méthode prometteuse pour estimer l'abondance de poissons (Capo et al. 2020) et qui s'est révélée efficace pour suivre la phénologie de la reproduction du corégone dans son milieu (Vautier et al. 2023).

Le suivi ADNe a été réalisé du 25 novembre 2021 au 25 janvier 2022. Les prélèvements et la filtration des échantillons d'ADNe sont réalisés comme indiqué dans le protocole détaillé de Vautier et al. (2021) et présenté dans Vautier et al., 2023. 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 où les filets étaient installés (Figure 1). En tout, 20 sous-échantillons sont prélevés à chaque sortie, pour un volume total de 4 L d'eau. Les flacons, les bouteilles d'eau et tout le matériel qui sera amené 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 l'après-midi entre 13h30 et 15h30, soit avant l'arrivée des corégones sur site (détermination de l'arrivée faite par la caméra acoustique, voir protocole ci-après). 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 conservés dans du tampon de préservation (EDTA 40 mM, Tris-HCl (pH 8) 50 mM and sucrose 0,75 M), et stockés à -20°C.

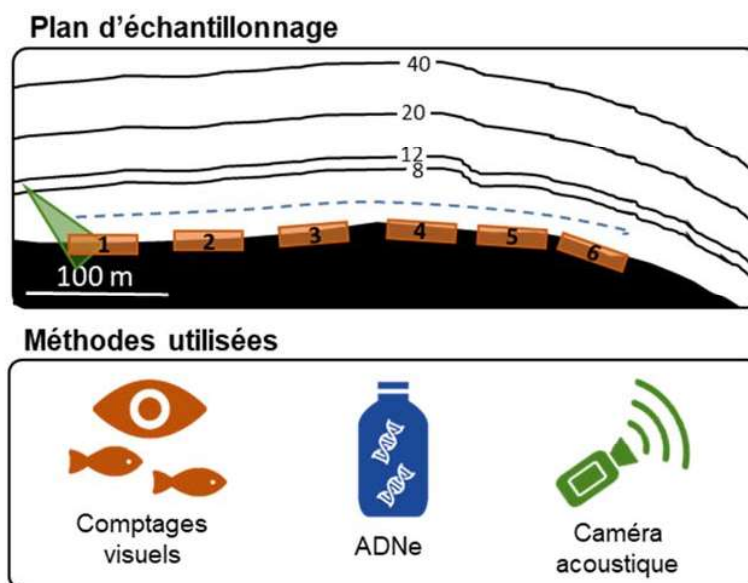


Figure 1 : Plan d'échantillonnages pour le suivi de la reproduction du corégone. Rectangles oranges = transects de comptages visuels. Triangle vert = cône de la caméra acoustique. L'eau pour l'ADNe est prélevée tout le long de la zone (20 x 200 mL = ligne bleue en pointillés représentant le transect)

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

Le suivi par ADNe a été arrêté en se basant sur les comptages par observation visuelle (voir ci-après la description de la méthodologie). L'ADN est extrait des cartouches congelées en suivant le protocole détaillé dans Vautier et al. (2023). Ce protocole utilise le kit d'extraction NucleoSpin® Soil (MACHEREYNAGEL) avec des adaptations spécifiques à l'utilisation des cartouches Sterivex. L'ADN est ensuite élué dans 30 µL de buffer SE préalablement chauffé à 55 °C, quantifié au Nanodrop (Thermo Scientific) et 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 QX200 ddPCR (Bio-Rad, Temse, Belgium) avec 4 µL d'ADNe et un volume total de 20 µL. 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.

2.1.2. COMPTAGES VISUELS

Des comptages visuels ont été également effectués sur le même site d'étude afin d'obtenir un indicateur d'activité des corégones (Figure 1). Cet indicateur s'obtient en dénombrant les individus identifiés comme corégone par un/e expert/e (Marine Vautier) depuis la rive au niveau du site d'étude (zone de frai). Ce suivi a été effectué entre le 26 novembre 2021 et le 25 janvier 2022 à raison d'une ou de deux sorties par semaine (deux fois quand l'activité était détectée comme la plus intense). Les poissons identifiés sont comptés depuis la rive du lac sur le même site d'étude après le coucher du soleil (~19h00) et à l'aide d'une lampe torche (450 Lumens). Chaque transect (6 au total) est échantillonné pendant 3 minutes en effectuant un réplica (comptage à l'aller et au retour) toujours par le/la même expert/e. Le risque de double comptage n'est pas exclu mais ce protocole permet d'obtenir un proxy d'activité et non d'abondance. Les poissons ne sont comptabilisés que lorsqu'ils étaient formellement identifiés comme des corégones. Durant le suivi hivernal 2021/2022, 16 opérations de comptage visuel ont été réalisées ; un minimum de 2 jours et un maximum de 7 jours ont séparé deux dates de comptage consécutives. Les comptages visuels n'ont pas été systématiquement réalisés les mêmes jours que les prélèvements ADNe. Les comptages visuels ont été arrêtés lorsque plus aucun corégone n'a été observé sur le site d'étude pendant 3 dates consécutives.

2.1.3. 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). Cette technologie s'appuie sur l'émission de sons à haute fréquence (de l'ordre du Méga Hertz). Composée de multifaisceaux (nombre = 148), 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 dans la gamme basse de fréquence disponible (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 enlevant la zone proche de la caméra (rayon de 1.1 m) et une zone de détection limitée au-delà de 13 m, la surface échantillonnée est d'environ 42 m². La fréquence utilisée est très haute, elle est considérée comme n'ayant pas d'influence sur le comportement des poissons (Simmonds and MacLennan 2005). Le dispositif a été installé à l'extrémité nord du site de la piscine municipale 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 9 décembre 2021 au 11 février 2022.

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 post-traitement.

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 filtrer les fichiers sources en capturant toutes les données contenant des corégones, tout en supprimant un nombre maximum de données sans passages de corégones. Le volume de données est ainsi réduit afin d'optimiser la suite des analyses.

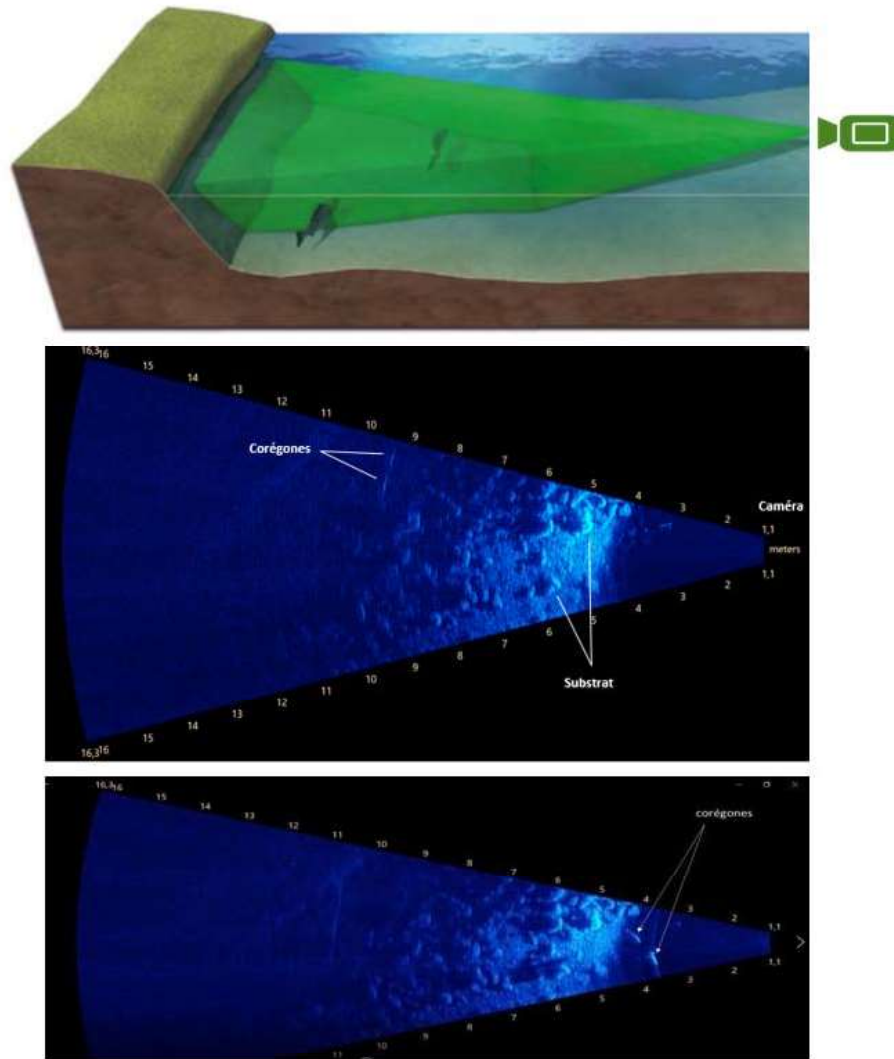


Figure 2 : vue 3D d'une installation type et du cône de détection avec la transcription de l'image acoustique sous ARISFish ; vidéo : https://www6.lyon-grenoble.inrae.fr/carrtel_fre/La-communication/Videos/Suivi-de-la-phenologie-du-coregone-Coregonus-lavaretus-sur-le-Leman-avec-la-camera-acoustique-ARIS

Figure 2: 3D view of a typical installation and the detection cone with the transcription of the acoustic image in ARISFish; movie: https://www6.lyon-grenoble.inrae.fr/carrtel_fre/La-communication/Videos/Suivi-de-la-phenologie-du-coregone-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) afin d'étudier la phénologie du corégone en zone littorale au cours de la saison de reproduction. En post-traitement, seuls les individus présentant les caractéristiques morphométriques similaires à celle du corégone sur le site ont été sélectionnés sur l'ensemble des données, soit des individus de plus de 0,20 m et moins de 0,60 m via R. De plus, les données sur les deux premiers mètres et les zones contenant des échos de macrophytes et/ou des cibles inconnues ont été aussi exclus des analyses. L'indicateur obtenu est un indicateur d'activité en nombre de détections (échos) par pas de temps journalier.

2.1.4. PÊCHES EXCEPTIONNELLES

Chaque année pendant le pic de reproduction, les pêcheurs professionnels procèdent à des captures de géniteurs afin de récolter les gamètes à des fins d'alevinage, sous couvert de l'administration. Ces pêches sont dites « pêches exceptionnelles ». Pendant l'hiver 2021/2022, les pêches exceptionnelles se sont déroulées sur plusieurs jours sur le site de Thonon. Ces données ne couvrant pas toute la période sont utilisées afin de compléter les autres méthodes. Le proxy d'abondance est exprimé en nombre d'individus capturés par filet (captures par unité d'effort). Les détails concernant le mode de capture sont présentés dans l'Arrêté portant sur l'autorisation de captures et de ventes de géniteurs de corégone et d'omble chevalier en période de protection des salmonidés du Léman N°DDT-2022-1422.

Pour l'ensemble des méthodes présentées dans ce présent rapport, la détermination du proxy d'abondance ou d'activité et la fréquence d'acquisition des données est présentée au tableau 1.

Tableau 1 : Proxies d'abondance ou d'activités 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)	1 fois par semaine
Comptages visuels	Nombre d'individus identifiés comptés	1 à deux 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
Pêches exceptionnelles	Captures par filet par les pêcheurs professionnels	Pendant le pic de reproduction

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 CARTEL - 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. A 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). 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 et 12 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 leur 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.

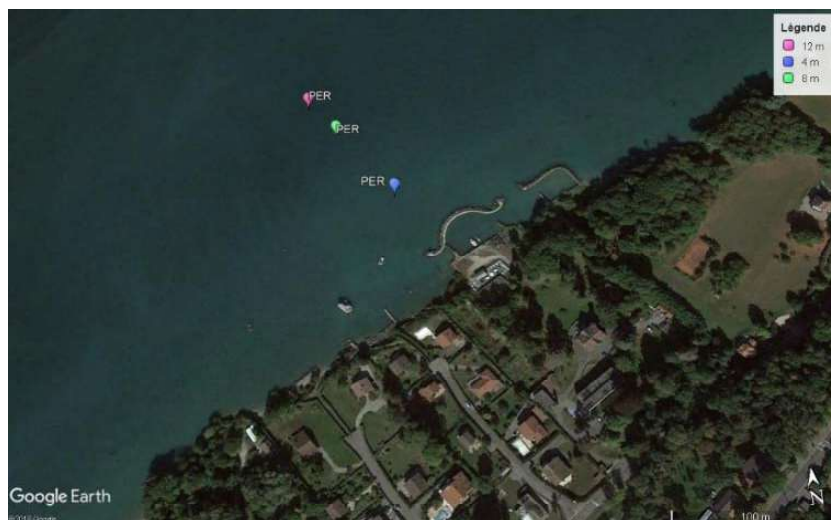


Figure 3 : Disposition théorique des frayères artificielles à différentes profondeurs (-4, -8 et -12 m) à proximité du port de l'UMR CARTEL (INRAE- USMB).

Figure 3: Theoretical layout of artificial spawning grounds at different depths (-4, -8 and -12 m) near the port of UMR CARTEL (INRAE-USMB).

Pour les deux espèces, le début et la fin du frai sont estimés lorsque les seuils de 10 % et 90 % des effectifs observés (géniteurs ou rubans d'œufs) sont atteints.

3. RESULTATS

3.1. COREGONE

3.1.1. HIVER 2021/2022

Les échantillonnages et observations ont tous pu être réalisés au moins une fois par semaine. Les variations des proxies d'abondance et d'activités sont présentés dans le tableau 2 pour le suivi 2021/2022 et pour l'année précédente. Pour l'ensemble des proxies analysés sur l'ensemble de la saison de pêche on note une diminution des proxies d'abondance ou d'activité pour 2021/2022 en comparaison à l'hiver 2020/2021. Cette baisse d'abondance pourrait indiquer une baisse du nombre de géniteurs présents dans la zone échantillonnée.

Tableau 2 : Proxies d'abondance ou d'activité pour les méthodes qui encadrent toute la période de reproduction pour les deux dernières années. Pour la caméra acoustiques les données ont été ré-analysées avec la même méthode (analyse automatique) afin de rendre les données comparables.

Table 2: Abundance or activity proxies for methods that cover the entire breeding period for the past two years. For the acoustic camera, the data was re-analyzed with the same method (automatic analysis) in order to use comparable data.

Méthodes	Proxy d'abondance ou d'activité 2020/2021	Proxy d'abondance ou d'activité 2021/2022
ADNe	36 639 copies/L d'eau filtré sur 10 dates	5723 copies/L d'eau filtré sur 10 dates
Comptages visuels	397 corégones comptés	185 corégones comptés
Caméra acoustique	14 710 echos sur 36 jours d'acquisition	1985 échos sur 52 jours d'acquisitions

Les résultats pour 2021/2022 (comparaison ADNe, comptage, captures par pêches exceptionnelles, caméra acoustique) sont présentés en Figure 4. Pour plus d'informations sur les comparaisons entre l'ADNe et le comptage, consulter Vautier et al., 2023.

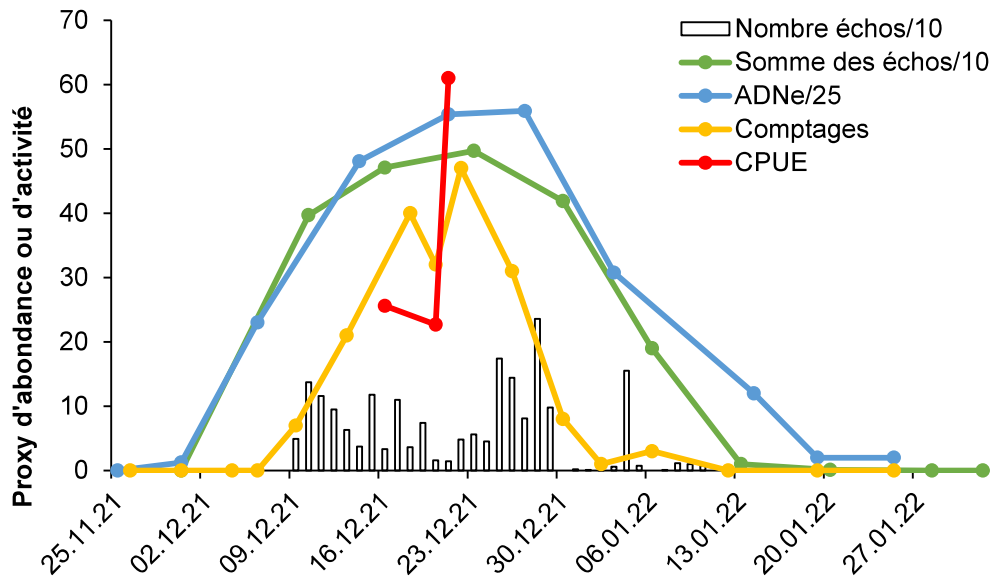


Figure 4 : Proxy d'abondance ou d'activité pour les différentes méthodes pour la saison de reproduction 2021/2022.

Figure 4: Abundance or activity proxies for the different methods for the 2021-2022 breeding season.

Au cours de l'hiver 2021/2022, une augmentation des proxies d'abondance a été observée entre le 6 et le 9 décembre (semaine 49) pour les trois méthodes (ADNe, comptages visuel et caméra acoustique).

L'apogée est atteinte entre le 21 (semaine 51) et le 27 (semaine 52) décembre pour la dynamique estimée par l'ADNe et le 22 décembre (semaine 51) pour les comptages visuels. Les pêches exceptionnelles mettent en avant une augmentation importante des captures entre le 20 et le 21 décembre (semaine 51), ce qui corrobore l'augmentation des corégones observés lors des comptages visuels effectués les 20 et 22 décembre. Les données journalières obtenues avec la caméra acoustique mettent en évidence une distribution bimodale avec un premier pic le 10 décembre et un second avec une activité importante le 28 décembre. Après le premier pic, une diminution s'observe jusqu'au 20 et 21 décembre 2021. Une nouvelle augmentation de la fréquence des cibles s'observe jusqu'au 25 décembre 2021. Un pic majeur s'observe le 28 décembre 2021 avec près de 236 cibles détectées sur la journée. Lorsque le nombre d'échos est sommé à la semaine la dynamique se rapproche de celles obtenues par les autres méthodes avec une période d'activité majeure entre les semaines 50 et 52. Le pic est obtenu en semaine 51 comme les comptages visuels.

Une baisse d'abondance significative est constatée dès le 30 décembre (semaine 52) pour les comptages visuels, et à partir du 3 janvier (semaine 1) pour l'ADNe. Pour les données de la caméra acoustique, mis à part les fortes valeurs obtenues le 28 décembre la cinétique décroît la même semaine à partir du 30 décembre (semaine 52). Une reprise de l'activité est cependant constatée le 4 janvier (semaine 1) pour ensuite rebaisser la semaine suivante.

Avec un enregistrement en continu, la caméra acoustique permet d'obtenir des informations tous les jours à des pas de temps fins, notamment sur les rythmes d'activité horaires. Ces données mettent en évidence de fortes variations journalières de l'activité de reproduction. Les prélèvements ADNe et les comptages visuels sont ponctuels (prélèvement ou observations durant quelques heures dans la journée, 1 à 2 fois par semaine). Les échelles spatiales sont également différentes, ces deux dernières méthodes intègrent le signal de la reproduction sur l'ensemble du site de Ripaille (plusieurs centaines de mètres), tandis que la caméra n'observe la reproduction que sur quelques mètres. On constate par exemple que le 30 décembre aucun écho n'a été observé avec la caméra acoustique, alors que des corégones ont été observés en comptages visuels. Le 4 janvier de nombreux échos ont été observés avec la caméra, mais ce pic tardif n'a pas été identifié avec la même ampleur par les autres méthodes même si une légère augmentation du nombre d'individus identifié par comptages est à noter pour le 6 janvier. Les méthodes utilisées sont

donc complémentaires, avec une meilleure définition spatiale pour l'ADNe et les comptages visuels alors que la caméra acoustique offre une meilleure définition temporelle. Il existe tout de même des similitudes entre les résultats obtenus avec toutes ces méthodes, avec notamment un début de reproduction entre le 6 et le 9 décembre (semaine 49), et un maximum d'activité estimé entre le 21 et le 28 décembre. Des différences sont constatées entre la caméra et les autres méthodes notamment du point de vue de la distribution lorsque les données sont regardées à l'échelle journalière. Cependant, lorsque les données sont sommées à la semaine (somme des échos obtenus par la caméra) la distribution obtenue par la caméra est proche de celles des comptages visuels et de l'ADNe. L'hypothèse avancée pour expliquer les différences pour certains jours entre la caméra et les deux autres méthodes résiderait dans une plus faible abondance des individus et une répartition moins homogène sur la rive. Il est ainsi possible que la baisse d'activité journalière constatée par la caméra lors du pic obtenu soit due à une répartition différente des poissons le long du littoral. Les comptages visuels nous informent que la distribution diffère selon les transects et les dates avec notamment moins d'observations sur le transect sur lequel la caméra est positionnée (Annexe 2). De plus avec cette faible abondance, les résultats seraient plus sensibles aux variations journalières.

La dynamique de reproduction a été déterminée en 2021/2022 par les comptages visuels qui ont été réalisés avec plus de campagnes que l'ADNe et donc serait le meilleur compromis vis-à-vis des contraintes temporelles et spatiales, mais nécessite la mobilisation de personnel en dehors des heures classiques de travail. Le 12 décembre (10 % de captures totales), la période de reproduction avait débuté. La date correspondant à 50 % des effectifs se situe le 20 décembre, et le 22 décembre correspond à la date où le maximum d'individus observés a été constaté (47 corégones) (Figure 5).

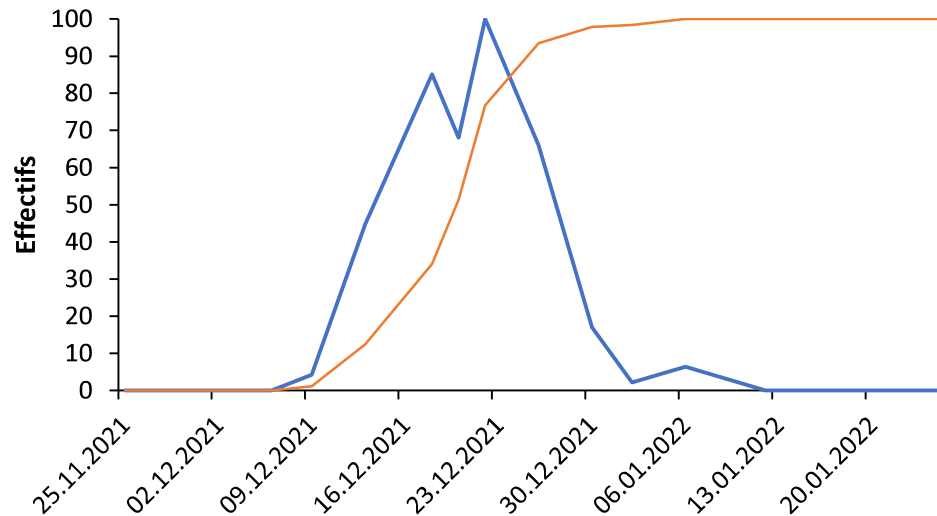


Figure 5 : Effectifs bruts (bleu) et cumulés (en orange, exprimés en pourcentage) de corégones observés par comptage visuel au cours de la saison de reproduction 2021-2022.

Figure 5: Numbers (blue) and cumulative numbers (in orange, expressed as a percentage) of whitefish observed by visual counting during the 2021-2022 breeding season.

3.1.2. COMPARAISON INTERANNUELLE DE LA PHÉNOLOGIE

Les données obtenues dans le cadre du suivi de la phénologie, exprimées en effectifs cumulés sur l'ensemble des données, ont été comparées aux données des années précédentes, avec les pêches aux filets qui possédaient des captures suffisantes pour étudier la dynamique, c'est-à-dire les hivers 2015-2016 à 2017-2018, et les comptages visuels pour l'hiver 2020/2021 et 2021/2022 (Figure 6). Pour plus de détails sur les années et méthodes d'échantillonnages (filets, ADNe, comptages visuels et caméra acoustique) consulter l'Annexe 1 et Rogissart et al., 2023.

Les données obtenues dans le cadre du suivi de la phénologie, exprimées en effectifs cumulés sur l'ensemble des données, ont été comparées pour les années pour lesquelles il n'y a pas de biais lié à un manque dans l'échantillonnage et à un effectif trop faible (Figure 8). D'après les données analysées, la saison de reproduction débuterait plus précocement que pour les deux premiers hivers de suivis 2015/2016 et 2016/2017. Le début de la reproduction serait proche de l'hiver 2020/2021. Pour ces deux hivers, les températures sont très proches. Les données des températures en sub-surface obtenues en novembre et décembre 2020 et 2021 au point SHL2 confirment les températures élevées observées, similaires à celle obtenues lors de l'hiver 2015/2016 pour laquelle la température de l'eau était particulièrement chaude. Les températures chaudes en 2015/2016 avaient entraîné un décalage dans la période de reproduction.

Comme l'année précédente, une dynamique étroite (début en semaine 50 et fin de la reproduction en semaine 51) et peu en lien avec les températures pourrait s'expliquer par la dominance de peu de générations dans la pêche, mais l'influence des facteurs liés à l'âge et à la taille des individus sur la phénologie serait à approfondir. Des analyses ont débuté avec la caméra acoustique afin de déterminer la taille des individus détectés de façon semi-automatique (Rogissart et al. 2023), ce qui permettra d'avoir en plus du proxy d'activité, une information sur les structures en tailles des individus présents sur le site.

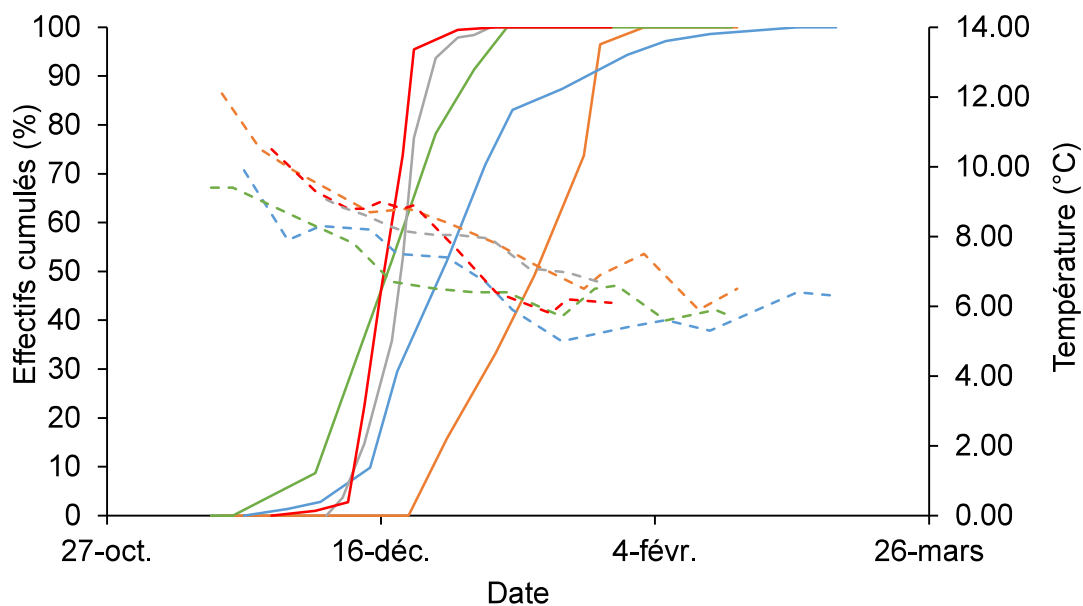


Figure 6: Effectifs cumulés calculés à partir des pêches aux filets pour les hivers 2015/2016 (trait plein orange), 2016/2017 (trait plein bleu), 2017/2018 (trait plein vert) et calculés à partir des comptages visuels en 2020/2021 (trait plein rouge) et 2021/2022 (trait plein gris). Données de températures moyennes journalières mesurées à 2 m de profondeur dans le port de INRAE (traits pointillés orange : 2015/2016, bleu : 2016/2017, vert : 2017/2018, rouge 2020/2021 ; gris : 2021/2022)

Figure 6: Cumulative numbers obtained from scientific fishing for the winters of 2015/2016 (solid orange line), 2016/2017 (solid blue line), 2017/2018 (solid green line) and calculated from visual counts in 2020/2021 (solid red line) and 2021/2022 (grey). Daily average temperature data measured at 2 m depth in INRAE port (dotted orange lines: 2015/2016, blue: 2016/2017, green: 2017/2018, red 2020/2021, grey: 2021/2022)

3.2. PERCHE

Les données de 2022 ont été comparées à celles de 2021 (Figure 7). En 2022, 21 relèves de frayères ont pu être effectuées avec 792 rubans récoltés. Le nombre de rubans est 16 fois plus important qu'en 2021 (49 rubans avaient été récoltés). Le nombre de rubans est en lien avec le nombre de génitrices présentes dans la zone (Gillet et al. 2013).

C'est à 8 m et 12 m de profondeur que le nombre de rubans est le plus important (391 et 399 respectivement), avec une quasi-absence de rubans constatée à 4 m de profondeur (2 rubans soit moins de 0.01 % du total). Un changement vers des profondeurs plus importantes a été constaté au cours du temps avec une raréfaction de la dépose des rubans à 4 m au profit des frayères à 8 et 12 m, en particulier depuis 2015 (Goulon et al. 2022).

En 2022, le nombre de rubans à 12 m est équivalent au nombre de ruban à 8 m pouvant souligner la présence d'une forte génération de perches utilisant l'ensemble des substrats disponibles aux profondeurs favorables.

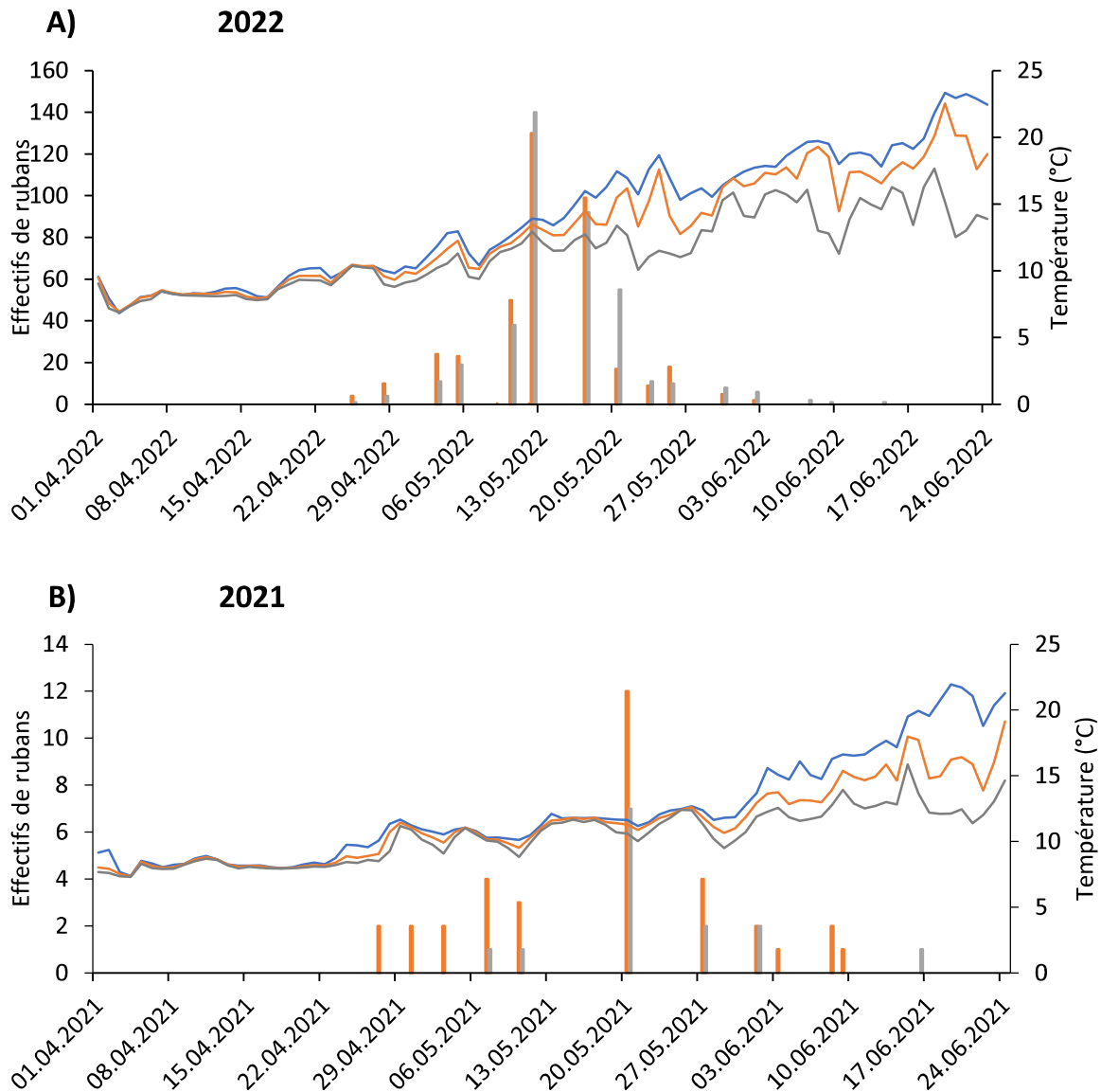


Figure 7 : Nombre de rubans de perches récoltés en a) 2022 et en b) 2021 par frayère à -4 m (bleu), -8 m (orange) et -12 m (gris). Les courbes représentent les températures relevées à -4 m (en bleu), à -8 m (en orange) et à -12 m (en gris) de profondeur.

Figure 7: Number of perch ribbons harvested in a) 2022 and b) 2021 per spawning ground at -4 m (blue), -8 m (orange) and -12 m (grey). The curves represent the temperatures recorded at -4 m (in blue), at -8 m (in orange) and at -12 m (in grey) in depth.

En 2022, le frai débute la première semaine de mai comme en 2021 pour des températures proches de 10°C (Figure 8).

Les dates d'apogées diffèrent cependant avec des dates plus précoces pour 2022 en comparaison avec 2021 (12 mai en 2022 contre 20 mai en 2021). La date des 50 % correspond à la date du 11 mai en 2022 tandis qu'en 2021 la date estimée se situerait aux alentours du 17 mai. Enfin la date des 90 % est également plus précoce en 2022 qu'en 2021 (20 mai en 2022 contre aux alentours du 7 juin en 2021)

En 2021 comme en 2022 les températures ont augmenté fin avril expliquant des dates similaires de début de la reproduction. Cependant 2021 a été marqué par de multiples événements venteux de fortes intensités empêchant les températures d'augmenter avant le 20 mai, ce qui n'est pas le cas en 2022 avec des températures qui augmentent de façon progressive au cours du temps.

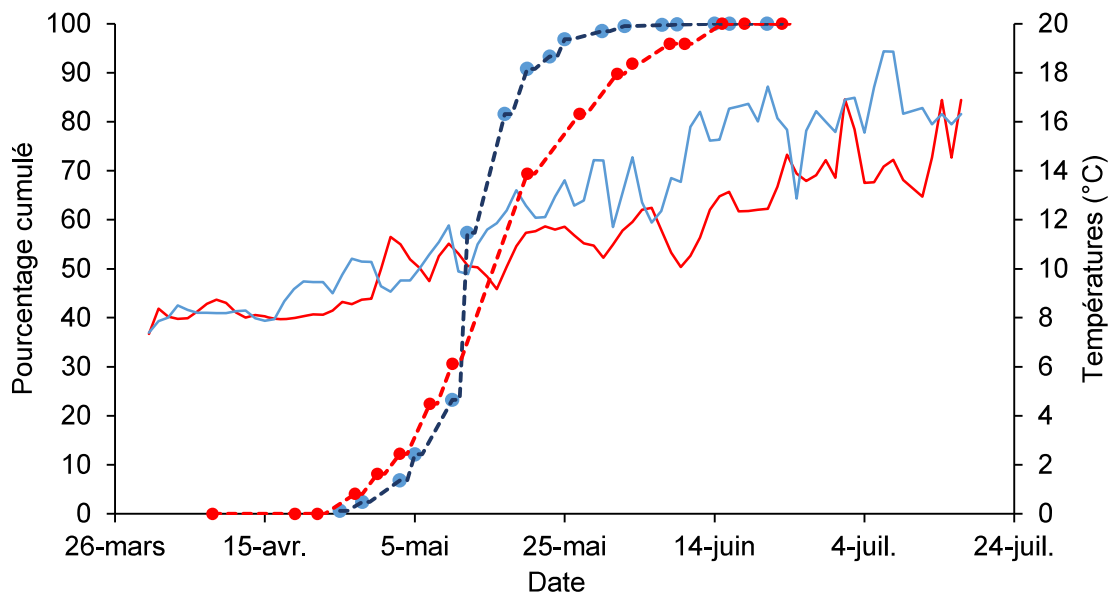


Figure 8: Comparaison des températures moyennes (à -8 et -12 m de profondeur), entre 2022 (bleu) et 2021 (rouge), dynamique de frai pour l'année 2022 (bleu) et 2021 (rouge) et en effectifs cumulés de rubans, exprimés en pourcentage, récoltés sur les frayères artificielles à toutes profondeurs confondues (-4, -8 et -12 m).

Figure 8 : Comparison of average temperatures (at -8 and -12 m depth), between 2022 (blue) and 2021 (red), spawning dynamics for the year 2022 (blue) and 2021 (red) in cumulative numbers of ribbons, expressed in percentage, collected on artificial spawning grounds at all depths (-4, -8 and -12 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 (Gillet et Dubois 2007). Les tailles des rubans obtenus dans le cadre du suivi de la reproduction de la perche ont pu être comparées entre 2021 et 2022 (Figure 9). En 2022, la taille des rubans est significativement plus faible qu'en 2021 avec une valeur médiane en 2022 à 25 mm contre 35 mm en 2021. Ainsi en 2022, la présence de perches de plus petite taille aurait pu induire une un pic de reproduction plus précoce qu'en 2021. Ceci va dans le même sens que les températures qui ont engendré une dynamique globale de reproduction plus précoce pour cette année de suivi. Le mois de mai est particulièrement chaud (moyenne inter-stations de + 3 degrés par rapport à la moyenne 1991-2020, Annexe V du rapport CIPEL).

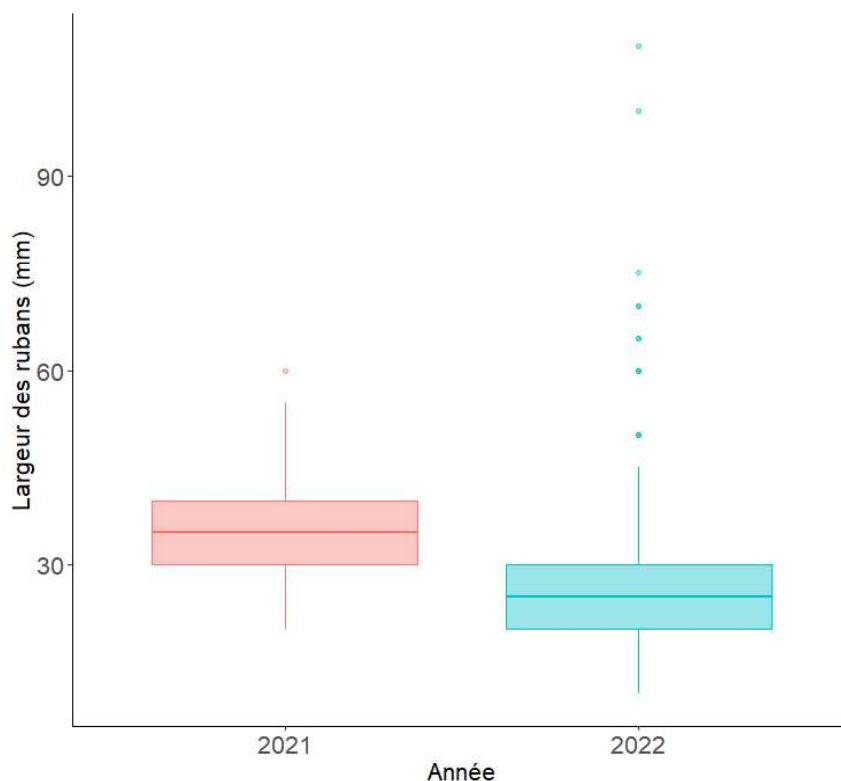


Figure 9: Répartition en largeur des rubans collectés en 2021 (rose) et en 2022 (bleu).

Figure 9: Distribution in width of the ribbons collected in 2021 (pink) and in 2022 (blue).

4. CONCLUSION

Concernant le suivi de la reproduction du corégone, les trois méthodes montrent une bonne concordance et de la complémentarité pour décrire cette phase du cycle de vie. En raison d'une bonne définition spatiale et de bons résultats d'inter-calibration avec la méthode de pêche aux filets (voir Vautier et al., 2023) les données obtenues par comptages visuels en 2021/2022 ont été comparées avec celles obtenues les années précédentes. Cependant il est à souligner que cette méthode reste contraignante pour le personnel (travail de nuit). Les comptages visuels mettent en évidence une dynamique de reproduction similaire à l'hiver 2020/2021 avec des températures proches. Les températures sont similaires à l'hiver 2015/2016 où la reproduction avait été tardive. Ces différences pourraient s'expliquer par des structures en taille et âges différentes. Malheureusement ces méthodes ne permettent pas pour l'instant de caractériser les géniteurs présents sur les sites de frai (taille, âge) même si des développements sont en cours avec la caméra acoustique. Cependant, tous les proxies d'activités obtenus sont plus faibles que l'année précédente (entre deux et six fois), laissant supposer une diminution du nombre d'individus venant se reproduire sur le site de Ripaille.

Pour la perche, la comparaison a pu être effectuée avec l'année 2021. En 2022, le début du frai est similaire à 2021 et la dynamique s'accélère ensuite en lien avec un réchauffement progressif des eaux. Ainsi en 2022, les dates du pic et de la fin de frai sont plus précoces qu'en 2021. La présence de plus petites perches qu'en 2021 pourrait également expliquer ou contribuer à une fraie plus précoce. En 2022, la dynamique du frai serait globalement plus précoce en lien avec les températures de l'eau plus élevées et la présence de plus petites perches dans la population.

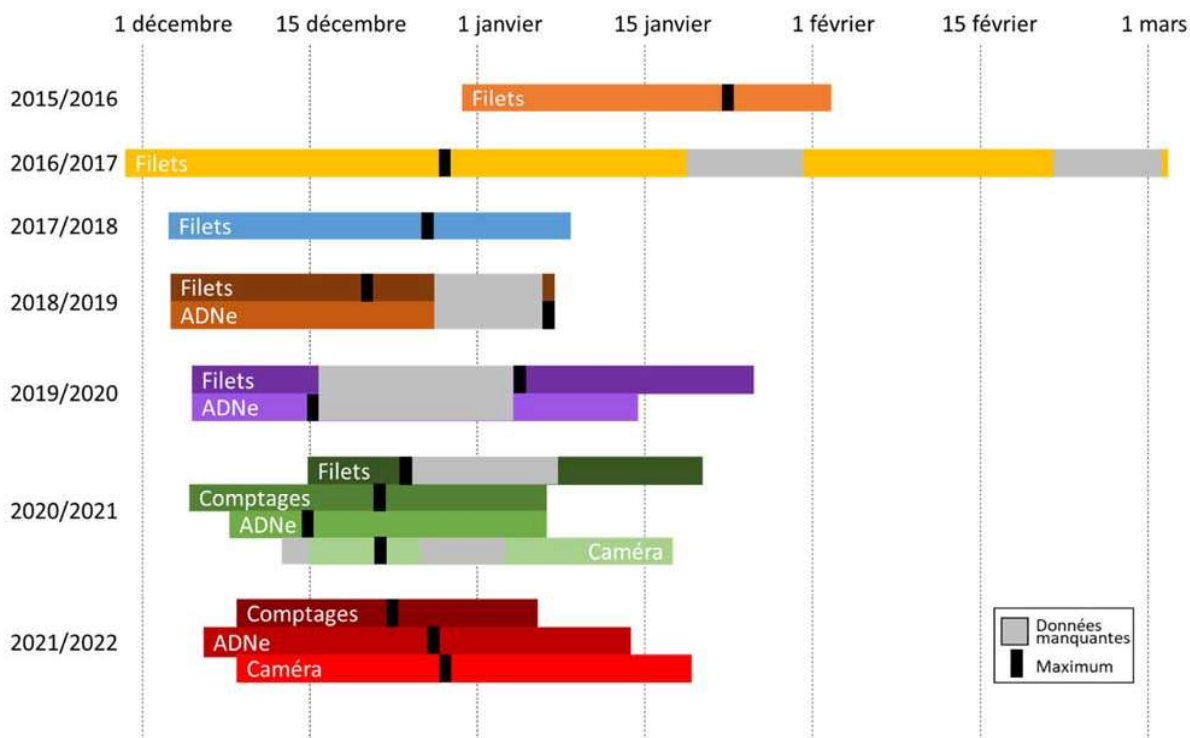
BIBLIOGRAPHIE

- 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., Matsuyama, B., & Trimble, G. (2001). Object identification with acoustic lenses. In OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition (pp. 6–11). Honolulu, HI: IEEE.
- 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.
- 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., 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. Quélin. 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.
- 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
- Rogissart, H., C. Rautureau, F. Cattaneo, C. Goulon, and J. Guillard. 2023. OPTHYLACS : Suivi de la reproduction du corégone (*Coregonus* sp.) dans le Léman à l'aide d'une caméra acoustique.
- Simmonds, J., and D. N. MacLennan. 2005. *Fisheries acoustics: theory and practice*, Blackwell, Oxford, UK.
- Thorpe, J. 1977. *Synopsis of biological data on the perch Perca fluviatilis Linnaeus, 1758 and Perca flavescens Mitchill, 1814*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 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
- Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, and others. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**: 389–395. doi:10.1038/416389a

ANNEXES

ANNEXE 1.

Comparaison des différentes méthodes de suivi de la reproduction du corégone (filets, ADNe, comptages visuels et caméra acoustique) entre les années 2016 et 2022. Les rectangles représentent la durée des observations. Le trait noir représente le maximum



ANNEXE 2.

Nombre de corégones observés par comptages visuels sur les différents transects.

