

Rapport de stage individuel

4^{ème} année DAE

Variation spatio-temporelle et impact des parasites
sur la longueur de l'intestin chez l'épinoche à trois
épines (*Gasterosteus aculeatus*) dans le lac Mývatn,
en Islande.

Hólar university college
Háskólinn á Hólum
551 Sauðárkrókur
Iceland



Superviseur :
Bjarni K. Kristjánsson
Head of department

REQUILLART Nathan
IMA
2021-2022

Tuteurs entreprise :
Joseph | Ragna G.
Phillips ; | Snorradóttir ;
Post-doctoral | PhD student

Tuteur académique :
Catherine Boisneau

Table des matières

Remerciements.....	2
Table des figures.....	2
Table des tableaux.....	3
Introduction.....	3
Présentation de l'entreprise.....	4
Contextualisation.....	6
L'épinoche à trois épines (<i>Gasterosteus aculeatus</i>).....	6
Variation phénotypique	6
Parasitisme	7
La mission	8
Matériels et méthode	8
Lieu de l'étude : le lac Mývatn.....	8
Méthodes	10
Terrain	10
Traitement des échantillons post capture.....	11
Traitement des données.....	13
Résultats.....	14
Données brutes.....	14
Sexe.....	16
Location	17
Stations.....	17
Bassins	19
Parasites	20
Discussions	21
Taille des poissons.....	21
Localisation.....	21
Sexe	22
Parasite.....	22
Générale.....	23
Conclusion	23
Conclusion de la recherche	23
Conclusion générale du stage.....	24
Bibliographie	24
Annexes.....	26

Remerciements

Premièrement, j'aimerais remercier mes maîtres de stage, Bjarni K. Kristjánsson, Joseph Phillips et Ragna G. Snorradóttir qui m'ont accueilli et accompagné tout au long de mon stage. Ils ont su se montrer disponibles tout au long de mon stage et ont pris le temps de répondre à mes questions, leurs expériences ont été d'une aide précieuse pour avancer correctement lors de la réalisation de mes tâches.

J'aimerais aussi remercier l'université d'Hólar et l'école Polytech Tours qui, grâce à leurs relations, m'ont permis de faire ce stage en Islande, un pays qui m'a toujours attiré par sa nature et ses paysages.

Enfin j'aimerais remercier toutes les personnes travaillant au laboratoire, des techniciens aux chercheurs en passant par les stagiaires, pour m'avoir aidé, fait découvrir autre chose que le sujet de mon stage et pour m'avoir fait passer des moments conviviaux.

Pour finir, je remercie mon enseignant référent, Catherine Boisneau, pour avoir accepté ce rôle et de s'être montrée disponible durant mon stage.

Table des figures

Figure 1: Modèle ECO EVO DEVO (Skúlason et al., 2019)	3
Figure 2 : localisation des différents lieux d'étude ; (maps et populationdata.net)	5
Figure 3 : Organigramme (holar.is, holaraquatic.is)	5
Figure 4 : Illustration d'une épinoche, <i>G. aculeatus</i> (Wootton, 1984)	6
Figure 5: Cycle de vie du parasite <i>Schistocephalus solidus</i> (Hébert et al., 2017).....	7
Figure 6: Le lac Mývatn et ses différents habitats, (Millet et al., 2013b).....	9
Figure 7: Différentes stations de récoltes des épinoches sur le lac Mývatn	10
Figure 8: Piège à vairons	11
Figure 9: Installation de l'appareil photo	12
Figure 10: Épinoche avec l'intestin retiré (à gauche) et un parasite (à droite).	13
Figure 11: Evolution de la taille des épinoches sur les 5 années étudiées	15
Figure 12 : test ANOVA à 95% ($\alpha=5\%$)	15
Figure 13 : Longueur de l'intestin des épinoches en fonction du sexe, relativement à leur taille, au fil des années.....	16
Figure 14: Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des stations du lac.....	17
Figure 15 a) et b) : Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des stations du lac pour chaque année.	18
Figure 16: Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des deux bassins du lac pour chaque année.	19
Figure 17: Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des deux bassins du lac.	20
Figure 18: Longueur relative de l'intestin entre les poissons parasités ou non.	21

Table des tableaux

Tableau 1 : Données brutes des 5 années étudiées.	14
Tableau 2: p-value ($\alpha=5\%$) du T-test sur les interactions de la taille des épinoches entre les différentes années.....	15
Tableau 3: Comparaison de la taille des intestins des épinoches par sexe.....	16

Introduction

La sélection naturelle est le processus par lequel les populations d'organismes vivants s'adaptent et changent. Les individus d'une population sont naturellement variables, ce qui signifie qu'ils sont tous différents à certains égards. Cette variation signifie que certains individus ont des traits mieux adaptés à l'environnement que d'autres. L'un des grands principes de la science de l'évolution est de comprendre comment la diversité biologique est générée et modifiée. Les individus avec des traits adaptatifs sont plus susceptibles de survivre et de se reproduire. De nombreux acteurs et interactions sont à l'origine de l'évolution. Pour bien comprendre l'évolution à travers ses facteurs, plusieurs champs de connaissances doivent être croisés pour avoir une compréhension plus complète de ce qui motive la diversité évolutive biologique. En 2019, des chercheurs (Skúlason et al., 2019) ont développé une nouvelle théorie sur la biologie évolutive du développement : connue sous le nom d'ECO, EVO, DEVO : faisant référence aux termes ECOLOGIE, EVOLUTION, DEVELOPPEMENT. La science de l'évolution étudie la transformation des espèces au cours du temps. La biologie évolutive du développement (EVO DEVO) a la variation phénotypique comme principal axe de recherche. Cette approche permet de déterminer quelle partie de la variation phénotypique peut être héritée et quelle partie peut être contestée par la sélection

Le modèle ECO-EVO-DEVO permet également d'intégrer l'écologie dans sa globalité et ainsi permettre une approche scientifique encore plus intéressante. Il s'agit donc de comprendre le rôle de chacun de ces éléments sur un environnement et sur la variation phénotypique d'une espèce et son développement.

En résumé, cette approche suggère que les différents processus interagissent et peuvent agir de manière dynamique, par des réactions réciproques (Figure 1).

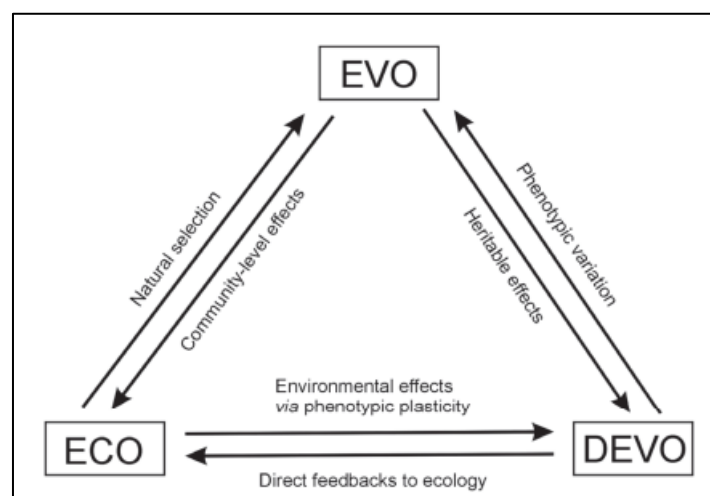


Figure 1: Modèle ECO EVO DEVO (Skúlason et al., 2019)

L'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*) est la plus connue des épinoches. En raison de son écologie et de son comportement, cette espèce est généralement considérée comme un trésor scientifique. En effet, cette espèce occupe un niveau trophique intermédiaire [20] et contribue à des fonctions écosystémiques précieuses (Hani et al., 2018). On retrouve l'épinoche à trois épines dans le lac de Mývatn en Islande. Ce dernier a la particularité d'abriter un grand nombre d'épinoche à trois épines mais aussi d'avoir une grande diversité d'habitats.

L'université d'Hólar a donc décidé de s'intéresser à l'évolution de cette espèce de poisson au fil des années en se basant sur le modèle ECO-EVO-DEVO. Le projet effectué pendant mon stage, s'intéressant à la longueur des intestins de l'animal, s'intègre donc dans ce grand projet d'étude de l'épinoche sur le long terme.

Présentation de l'entreprise

Mon stage a donc été effectué à l'université d'Hólar. C'est une célèbre école historique fondée en 1106 par l'évêque Jón Ögmundsson. Hólar (Hólaskóli - Háskólinn á Hólum) est aujourd'hui l'une des plus anciennes universités d'Europe. Depuis 2007, l'école est devenue une institution moderne de niveau universitaire.

L'université, dirigée par Hólmfríður Sveinsdóttir, est aujourd'hui composée de 3 départements pédagogiques (aquaculture et biologie, sciences équestres, tourisme rural) et d'un département administratif. L'université accueille environ 200 étudiants.

L'objectif du département *Aquaculture et biologie* des poissons est de promouvoir le développement professionnel de l'aquaculture de manière durable, de poursuivre l'éducation et de produire des connaissances sur la biologie aquatique et sur les poissons. La principale stratégie du département est de concilier recherche et enseignement.

Le bâtiment principal de l'Université est situé à Hólar, un village de la vallée de Hjaltadalur dans le district de Skagafjörður, au nord-ouest de l'Islande (Figure 2), mais l'université a pour extension un laboratoire appelé Verið au port de Sauðárkrúkur. Le lieu est un centre de recherche international dédié à l'étude des poissons. Le bâtiment appartient à Fisk, l'une des plus grandes entreprises de pêche d'Islande, et l'équipe de l'épinoche peut y travailler gratuitement. Les épinoches utilisées pour la recherche sont prélevées dans le lac Mývatn situé à environ deux heures et demie plus à l'est d'Hólar.



Figure 2 : localisation des différents lieux d'étude ; (maps et populationdata.net)

Le département d'aquaculture et de biologie des poissons est dirigé par Stefán Óli Steingrímsson, soutenu par 6 personnels techniques, 8 personnels académiques et des chercheurs postdoctoraux (Figure 3).

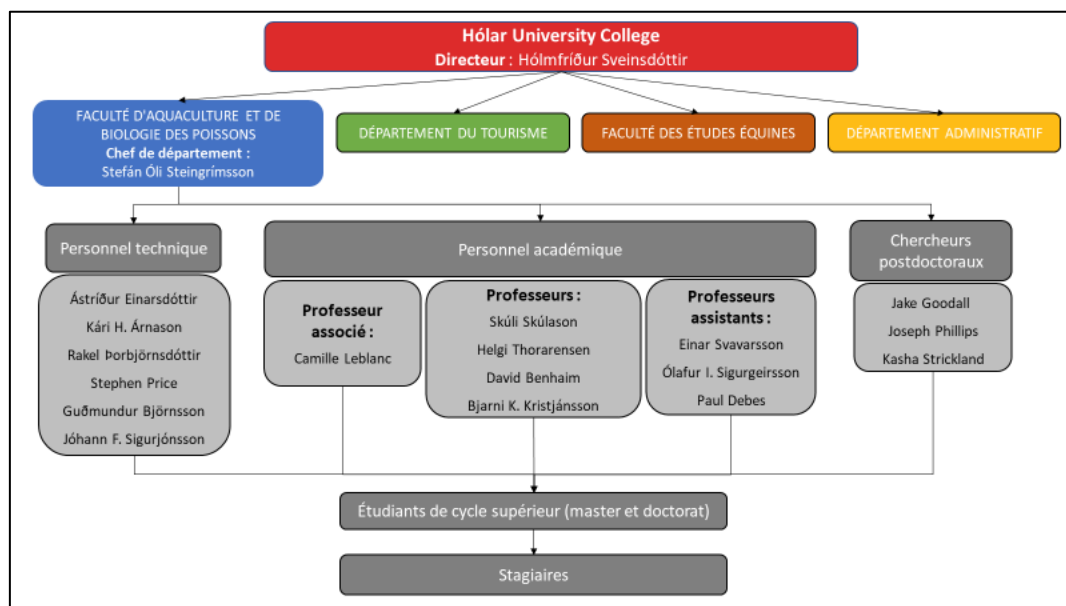


Figure 3 : Organigramme (holar.is, holaraquatic.is)

Contextualisation

L'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*)

Comme introduit plus haut, l'épinoche à trois épines est la plus connue des épinoches. Son nom vient des trois épines qu'on peut retrouver sur son dos précédant la nageoire dorsale, avec l'épine la plus proche de la nageoire dorsale beaucoup plus petite que les deux autres. Une autre particularité de l'épinoche sont ses nageoires pelviennes qui, au cours de l'évolution, se sont transformées en épines. Ces dernières ont perdu leur fonction locomotrice en devenant un élément défensif chez cet animal. *G. aculeatus* possède aussi des plaques osseuses latérales qui peuvent varier en nombre en fonction des individus et de son habitat. La taille adulte des épinoches à trois épines se situe généralement entre 35 et 80 mm de longueur totale (Wootton, 1984) (Figure 4).

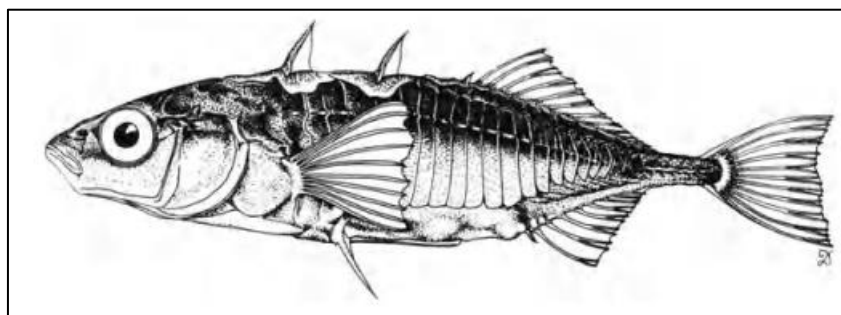


Figure 4 : Illustration d'une épinoche, *G. aculeatus* (Wootton, 1984)

Ce poisson est omnivore, il va particulièrement se nourrir de vers, crustacés, larves et adultes d'insectes aquatiques, œufs et de tous les petits animaux possibles qu'il peut trouver. Il peut même parfois se nourrir d'œufs et d'alevins de sa propre espèce. Son alimentation change au fil des saisons avec notamment une alimentation plus à base d'algues en automne et en hiver. La période de reproduction de l'épinoche se passe généralement entre le mois de mars au mois de juillet, voire même août pour certaines populations (*Gasterosteus aculeatus* / DORIS, s. d.; Wootton, 1984).

On peut la retrouver sur les trois continents du nord, essentiellement côtiers. Les épinoches n'aiment pas les eaux à courant rapide, on les trouve donc généralement dans les eaux lentes des lacs, des étangs, des cours d'eau de plaine et des baies côtières abritées. Elles ne vivent pas dans des habitats situés à plus de quelques centaines de mètres au-dessus du niveau de la mer (Reynolds et al., 1995; Wootton, 1984). Certaines populations de cette espèce peuvent résider en eau douce, être maritimes ou peuvent être anadromes, migrant vers la mer à l'automne puis revenant vers l'intérieur des terres au printemps pour se reproduire. Dans certains lacs, sa répartition spatiale est largement littorale mais dans d'autres, elle est limnétique. On peut donc retrouver dans des lacs une coexistence de ces deux populations (Wootton, 1984).

Variation phénotypique

En 2013, Millet et al. a montré l'existence d'une divergence phénotypique au sein du lac Mývatn qui refléterait une variation spatiale de la densité des proies et des prédateurs.

L'estomac et les intestins sont les organes permettant l'assimilation des proies ingérées par les poissons. Il est donc pertinent de s'interroger sur la variation de la taille des intestins au sein du lac afin d'observer si la variation du régime alimentaire des poissons au sein du lac influe sur leur longueur.

Le régime alimentaire semble influencer grandement la longueur de l'intestin, plusieurs études montrent que les herbivores avaient une taille d'intestin plus longue devant les omnivores et les carnivores (Karachle & Stergiou, 2010; Kramer & Bryant, 1995). Bien sûr, le régime alimentaire est très lié aux différences d'habitats. Karachle & Stergiou (2010) ont montré que différentes espèces de poissons, pour une même longueur totale, ont une plus grande longueur intestinale chez les espèces associées aux récifs, suivies des espèces pélagiques, benthopélagiques et démersales. Tous les habitats du lac Mývatn n'auront pas les mêmes nutriments et ainsi, les épinoches auront un régime alimentaire différent selon l'endroit où ils vivent sur le lac.

De plus, Wootton (1984) a signalé que « les femelles de la population du lac Supérieur, Wisconsin, atteignaient une longueur moyenne de 80 mm à l'âge de 5 ans ; les mâles les plus âgés avaient une longueur moyenne d'environ 68 mm à 3 ans », et les femelles ont besoin de plus d'énergie pour développer des gonades que les mâles, il peut donc y avoir une augmentation des réserves d'énergie stockées dans le corps.

Il y aurait donc un dimorphisme sexuel pour les individus âgés. Il peut donc être intéressant de voir si une différence est notable dans la longueur de l'intestin entre les sexes.

Parasitisme

D'autre part, l'assimilation des nutriments peut être modifiée également par la présence de parasites intestinaux. En effet, les épinoches à trois épines du lac Mývatn peuvent être contaminées par un ver solitaire et plus spécifiquement *Schistocephalus solidus*, présent dans les copépodes, une des proies des épinoches.

La contamination des poissons par *Schistocephalus solidus* commence premièrement par la contamination des copépodes par les larves du parasite (Figure 5). Les copépodes sont ensuite ingérés par les épinoches, ce qui permet au ver d'intégrer le système digestif du poisson et de se fixer à la paroi de l'estomac pour s'y développer. Lorsque les oiseaux prédateurs ingèrent une épinuche, le ver produit des œufs qui vont être transportés jusqu'au lac par le biais des excréments (Hébert et al., 2017)

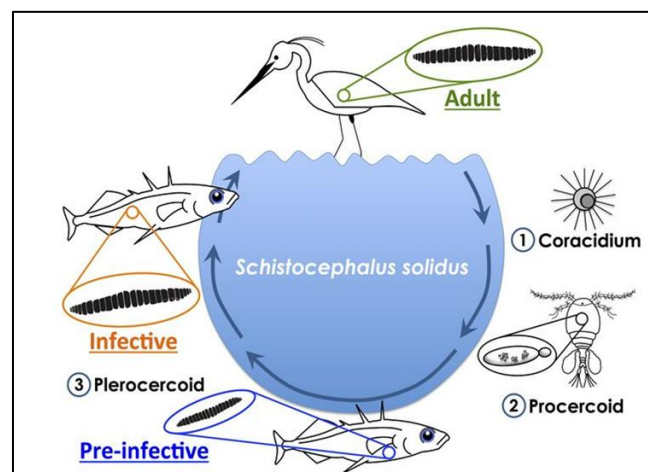


Figure 5: Cycle de vie du parasite *Schistocephalus solidus* (Hébert et al., 2017)

S.solidus se développe donc à l'intérieur du poisson, fixé sur la paroi de l'estomac. Il peut donc être pertinent de se demander si le développement du parasite dans l'épinoche nuit au développement des organes du poisson et notamment au bon développement de l'intestin, ou au contraire voir s'il y a une adaptation dans le développement des organes de l'épinoche.

La mission

Le but de cette étude est d'observer la présence ou non de variation de la morphologie trophique de l'épinoche à travers les différentes stations du lac, au fil des années. Les observations ont été réalisées sur 13 stations du lac, dont les caractéristiques (profondeur, température, végétation, prédateurs) varient. L'objectif est de démontrer que le phénotype trophique de l'épinoche, et plus particulièrement la longueur de son appareil digestif, s'est adaptée à son environnement. En effet, l'hétérogénéité du lac implique une variation dans la nourriture des épinoches qui peut se refléter par des variations dans la longueur de l'appareil digestif. Trois hypothèses sont testées :

- La longueur des intestins des femelles épinoches est plus importante que celle des mâles, relativement à leur taille.
- La longueur des intestins varie en fonction du régime alimentaire des épinoches et donc du lieu dans lequel le poisson se développe.
- La longueur des intestins sera plus petite pour les poissons parasités

Pour répondre à ces hypothèses, des épinoches à trois épines provenant de 13 stations du lac Mývatn ont été capturées en 2017, 2018, 2019, 2020 et 2021. Pour chaque poisson, des données morphologiques ont été collectées telles que la longueur totale du poisson, son poids, la longueur de ses intestins, la présence de parasites et d'œufs et le sexe.

Matériels et méthode

Lieu de l'étude : le lac Mývatn

Cette recherche étudiera donc les épinoches du lac Mývatn (Figure 2). C'est un lac eutrophe peu profond qui s'est formé il y a environ 2300 ans à la suite d'une éruption volcanique. Ce lac est divisé en deux bassins principaux, celui du Nord est plus petit (8,5 km²), plus profond en raison des opérations minières de 1967 à 2004, et est principalement alimenté par des sources d'eau chaude (jusqu'à 30°C). Le bassin sud est plus grand (28,2 km²), moins profond (profondeur max. 4 m) et alimenté par des sources d'eau froide. Les deux bassins diffèrent également par leurs caractéristiques biotiques, telles que le type de végétation, les densités de phytoplancton, de zooplancton et de mouches chironomes, ainsi que les densités d'épinoches et d'oiseaux. En raison de toutes ces caractéristiques, le système Mývatn est particulièrement intéressant pour les études sur la divergence spatiale multimodale (Millet et al., 2013b).

Le lac a été divisé en cinq types d'habitats différents en fonction de la couverture végétale/substrat, des communautés de cladocères et de la température de l'eau (Figure 6). Le bassin nord possède trois types d'habitats. Le premier est l'habitat « chaud » qui est caractérisé par un apport

d'eau chaude, des roches de lave et un substrat de boue siliceuse avec potamot clairsemé (*Potamogeton filiformis*). L'habitat « miné » (bassin N) correspond à la partie la plus profonde du lac avec un substrat très boueux, pas de végétation et des conditions partiellement anaérobies dues aux activités minières antérieures. L'habitat « Potamot » correspond à des zones peu profondes (la majeure partie du bassin N et l'extrémité nord du bassin sud) avec le potamot (*Potamogeton* spp.) comme végétation principale. L'habitat « Cladophorales » (bassin S) correspond à une vaste zone de vase nue interrompue par des plaques d'algues Cladophorales formant des tapis. L'habitat « Rivage » (bassin S) correspond à environ un rivage de 1 m de profondeur avec roches et végétation clairsemées. L'habitat chaud est constamment chaud (20 à 23 °C), alors que tous les autres habitats sont en moyenne beaucoup plus froids et suivent la température ambiante (fourchette moyenne en été de 11 à 13 °C) (Millet et al., 2013b).

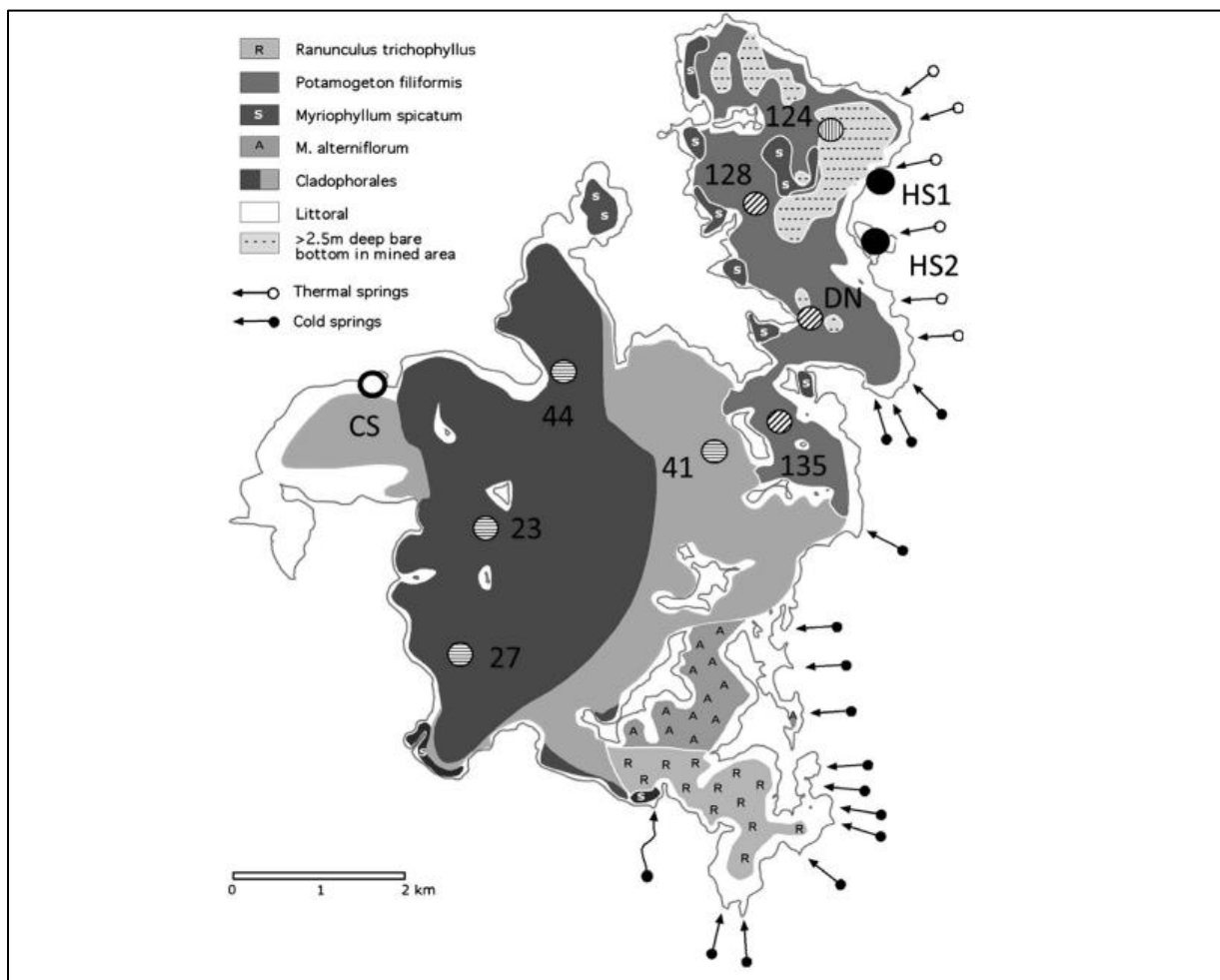


Figure 6: Le lac Mývatn et ses différents habitats, (Millet et al., 2013b)

Méthodes

Terrain

Les épinoches sont récoltées deux fois par an pendant la saison de reproduction au mois de juin et d'août. Les poissons sont récoltés sur les 13 stations du lac positionnées en fonction des types d'habitats (Figure 7). Pour chaque station, cinq pièges à vairons (Dynamic Aqua-Supply Ltd, Surrey, BC, Canada, maille de 3,2 mm) sont posés dans l'eau, à une distance de 5 mètres les uns des autres (Figure 8). Les pièges sont relevés après 12h, les poissons sont récupérés et les pièges sont replacés au même endroit pour 12h de plus, afin de couvrir la nuit (« nightcatch ») et la journée (« daycatch »). Une fois les 2 sessions de piégeage de 12 heures terminées, les pièges sont retirés. Les prélèvements des 5 stations situées sur le rivage (soit CS, SS, HS (1 et 2), GS et NS) sont assurés à pied, par le laboratoire de l'université d'Hólar alors que les prélèvements concernant les stations au milieu du lac sont réalisés par bateau, en collaboration avec la station de recherche du lac Mývatn.

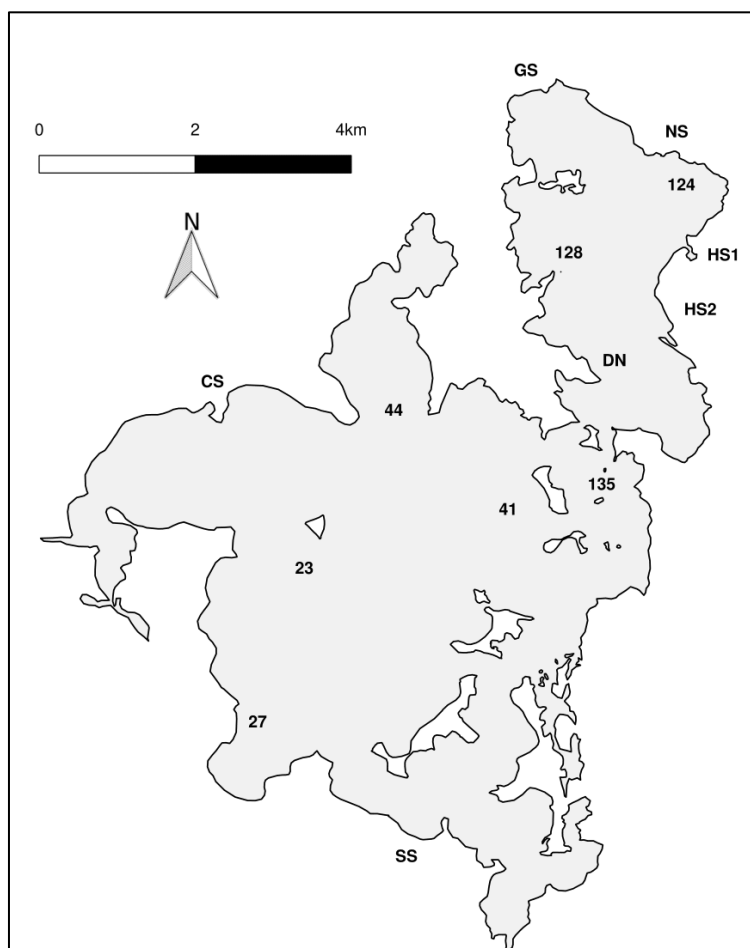


Figure 7: Différentes stations de récoltes des épinoches sur le lac Mývatn



Figure 8: Piège à vairons

Traitement des échantillons post capture

Après traitement par le froid pour s'assurer que les poissons soient bien morts et permettre leur conservation, ils sont ensuite préparés avant d'être ramenés au laboratoire.

Les poissons sont tout d'abord comptés et séparés en fonction de leur taille pour chaque piège de chaque station. Les poissons inférieurs à 50 mm sont considérés comme « petits » et ceux supérieurs à 50 mm sont considérés comme « grands ». Ensuite, par station, un échantillon aléatoire de 50 poissons est identifié pour chacune des deux catégories de taille et par moment de la capture (nightcatch ou daycatch). Ces 200 poissons sont donc mesurés, pesés et leur nageoire pectorale droite est prélevée et conservée dans de l'éthanol à 95 % pour effectuer des tests ADN dans un autre laboratoire. Ils se voient alors attribuer un numéro d'identification unique composé des initiales du chef de projet, de l'année de capture (2 premiers chiffres) et de 4 chiffres aléatoires. Par exemple, BK170031 est un échantillon provenant d'un poisson capturé en 2017 pour le projet s'intéressant aux épinoches à trois épines. Chaque poisson est par la suite conservé dans de l'éthanol 70% pendant au minimum 5 semaines. Les poissons restants sont simplement comptés pour chaque station afin d'estimer la taille de la population.

Protocole

Afin de conserver une image du poisson avant toute opération, la face latérale gauche du poisson est photographiée afin d'avoir la nageoire pectorale et les deux premières épines dorsales sont relevées. Le poisson est disposé au centre d'une boîte de pétri, contenant dans son fond une fine couche de cire bleue. Son code d'identification ainsi qu'une petite feuille de papier millimétré sont déposés en dessous du poisson. L'appareil photo utilisé est disposé sur une installation composée de lumières. Il est incliné vers le bas et l'écran est positionné parallèlement à la paillasse, à l'aide d'un niveau à bulle (Figure 9). La photographie est prise en haute résolution avec une mise au point sur l'œil.



Figure 9: Installation de l'appareil photo

Une fois le poisson photographié, il est mesuré au millimètre près avec une planche de mesure puis pesé avec une balance analytique de précision 0,0001 g (seulement 2 chiffres après la virgule seront conservés).

Une fois toutes ces étapes passées, la dissection peut commencer. Le poisson est donc incisé et découpé à partir du cloaque, puis à travers l'épine pelvienne droite jusqu'à la gorge. Des forceps sont utilisés pour ouvrir le corps et examiner les gonades afin de déterminer le sexe du poisson.

S'il y a des parasites ou des œufs, ils sont retirés et conservés dans un tube Eppendorf contenant de l'éthanol à 95% avec une étiquette d'identification. Les parasites sont comptés et pesés avant d'être stockés.

A l'aide d'une pince fine, l'œsophage est saisi juste au-dessus de l'estomac et tiré pour le déchirer. Ensuite, l'œsophage est lentement tiré du corps du poisson, sans déchirer l'estomac afin de dérouler et sortir la totalité de l'intestin du poisson. La longueur de l'estomac et de l'intestin est mesurée au millimètre près à l'aide de la planche à mesurer et les viscères sont conservés avec une étiquette dans un tube Eppendorf contenant de l'éthanol à 95% (Figure 10).

Ensuite, le poisson est replacé dans son sac en plastique transparent à fermeture en glissière et conservé dans un récipient rempli d'éthanol à 95 %.



Figure 10: Épineche avec l'intestin retiré (à gauche) et un parasite (à droite).

Dans le cadre de mon stage, seules les épineches de juin 2017, 2019 et 2021 ont été disséquées par mes soins. J'ai demandé à mes tuteurs de m'envoyer les données des poissons de juin 2018 et 2020, qui avaient déjà été disséqués, pour avoir des données qui se suivent d'année en année.

Traitement des données

Toutes les informations collectées sont écrites sur papier sur une feuille de laboratoire (Annexe 1). Ainsi, pour chaque numéro d'identification, correspondant à un poisson, la date de dissection, la taille et le poids du poisson, la longueur de l'appareil digestif, le sexe, le nombre de parasites et leurs poids et la présence d'œufs sont annotés. Ces fiches sont par la suite rentrées sur un tableur Excel.

Afin de pouvoir rendre compte des résultats obtenus par les différentes mesures effectuées sur les poissons, il est nécessaire de réaliser des analyses statistiques sur cette base de données. Toutes les analyses sont effectuées sur le logiciel R Studio 2022.07.1+548.

Dans un premier temps, un modèle linéaire a été appliqué sur les données de longueur des intestins en prenant comme facteur fixes la longueur totale du poisson, le sexe, les stations du lac, l'année de capture et la présence de parasite ou non.

Par la suite, un test de comparaison de variances ANOVA à 95% (risque $\alpha = 5\%$) a été appliqué sur le modèle.

Enfin, il est logique que la taille de l'intestin augmente avec la taille du poisson. De ce fait, tous les résultats ont été produits avec la longueur relative de l'intestin. Pour obtenir cette longueur relative de l'intestin de chaque poisson, un modèle linéaire a été créé entre la longueur de l'intestin et la taille du poisson. Ensuite, les résidus de ce modèle ont été récupérés et insérés au tableau de valeur. Ainsi pour chaque épineche, si sa longueur d'intestin relative est supérieure à 0, alors il a un intestin plus

long que la « normale » et inversement pour ceux ayant une longueur d'intestin relative inférieure à 0. (Annexe 2)

Résultats

Données brutes

Sur ces 5 années, il y a eu 968 poissons traités avec environ 100 femelles de plus que les mâles et 73 poissons parasités. La taille moyenne est d'environ 50 mm pour un poids moyen de 0.9 g pour une étendue de 31 mm à 80 mm et 0.08 g à 3.68 g respectivement. La longueur de l'intestin est d'environ 27 mm (Tableau 1). Une chose intéressante est qu'on peut voir une augmentation de la taille des poissons au fil des années (Figure 11) avec une légère diminution pour l'année 2021. Le tableau 2 montre une évolution significative pour les 4 premières années.

De plus, le test ANOVA appliqué sur le modèle linéaire nous montre que toutes les variables influencent la longueur de l'intestin des épinoches ($p < 0.05$) hormis le paramètre « parasite », qui indique si le poisson est parasité ou non (Figure 12).

Tableau 1 : Données brutes des 5 années étudiées.

nb_fish	nb_female	nb_male	nb_fishpara	
968	530	435	73	
	length (mm)	weight (g)	gut_length (mm)	parasite_per_fish
mean	49.5	0.90	26.6	2.3
min	31.0	0.08	7.0	1
max	80.0	3.68	58.0	16

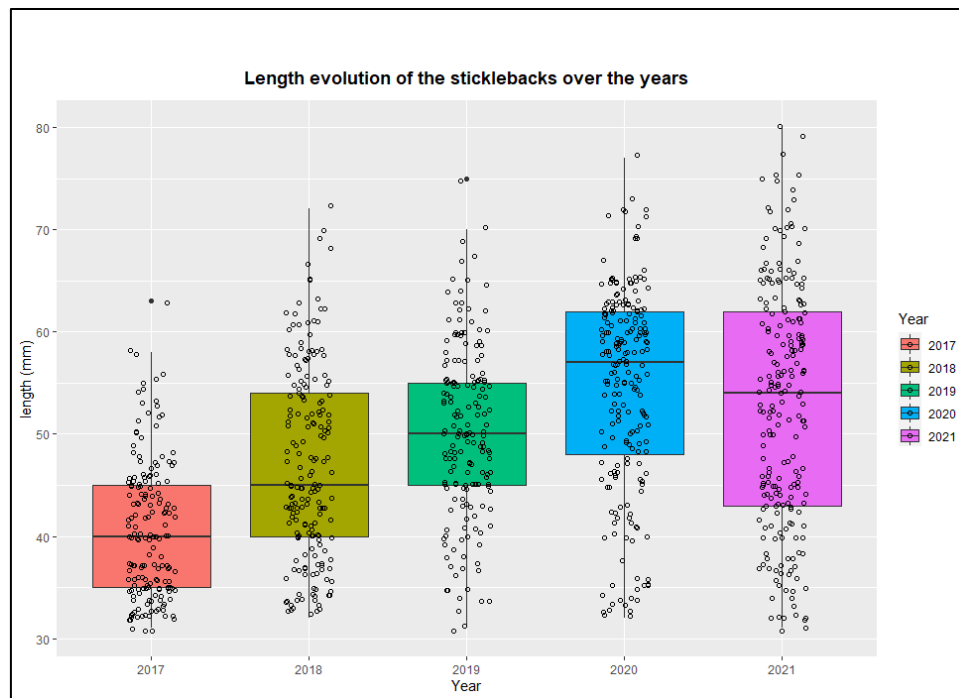


Figure 11: Evolution de la taille des épinoches sur les 5 années étudiées

Tableau 2: p-value ($\alpha=5\%$) du T-test sur les interactions de la taille des épinoches entre les différentes années

	Interaction entre les années			
	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021
P-value	$5.011 \cdot 10^{-13}$	$7.687 \cdot 10^{-4}$	$7.431 \cdot 10^{-6}$	0.109

Analysis of variance Table

Response: gut_length..mm.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
length..mm.	1	80235	80235	6446.6543	< 2.2e-16	***
station	12	735	61	4.9203	6.381e-08	***
Year	4	2523	631	50.6746	< 2.2e-16	***
sex	1	544	544	43.7175	6.469e-11	***
parasite	1	4	4	0.3108	0.5774	
station:Year	41	1601	39	3.1375	4.226e-10	***
Residuals	907	11289	12			

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figure 12 : test ANOVA à 95% ($\alpha=5\%$)

Sexe

Le modèle ANOVA a montré que le sexe influence la longueur de l'intestin des épinoches. Sur l'ensemble des années, les femelles ont tendance à avoir un intestin plus grand que les mâles, relativement à leur taille, en moyenne les femelles ont une longueur relative d'intestin supérieure à la « normale » alors que pour les mâles, cette longueur est inférieure à la « normale » (Tableau 3).

Tableau 3: Comparaison de la taille des intestins des épinoches par sexe

	Mâle	Femelle
Longueur relative moyenne de l'intestin	- 0.43	0.35
Longueur moyenne de l'intestin (brute)	48.28 mm	50.50 mm

De plus, le graphique ci-dessous (Figure 13) nous montre que la longueur relative de l'intestin, chez les femelles, est plus grande que chez les mâles sur trois années de suite (2019, 2020 et 2021). On observe aussi que la longueur relative de l'intestin est plus importante chez les mâles en 2017 mais s'équilibre avec celle des femelles en 2018.



Figure 13 : Longueur de l'intestin des épinoches en fonction du sexe, relativement à leur taille, au fil des années.

Location

Stations

La figure 14 montre que la longueur relative des intestins des épinoches n'est pas la même en fonction des stations qu'elles soient proches les unes des autres ou qu'elles appartiennent au bassin nord ou sud. Par exemple, la longueur relative moyenne des intestins (LRMI) des poissons de la station 124, qui appartient au bassin nord du lac, est plus grande que celle de la station 23 mais plus petite que celle de la station 135, qui appartiennent toutes les deux au bassin sud du lac.

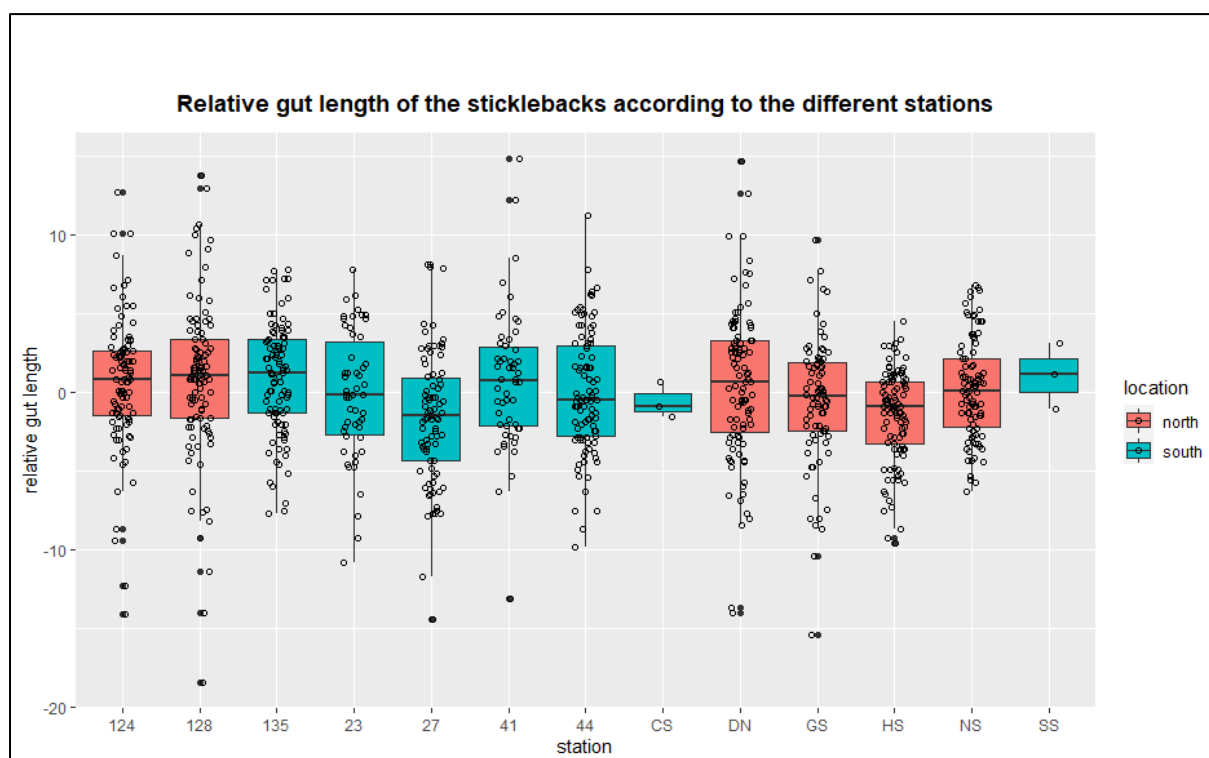


Figure 14: Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des stations du lac.

Néanmoins, la figure 15 a) nous montre des similitudes entre certaines stations du bassin nord, comme les stations 124, 128, et DN. On peut aussi voir des similitudes entre des stations du bassin sud, comme les stations 27, 41, 44 et 23.

Les stations CS et SS n'ont pas de données pour les années 2017, 2018 et 2020 et très peu de poissons attrapés sur les années 2019 et 2021.

Les LRMI des poissons de chaque station semblent plus petites en 2017 que sur les autres années (leurs moyennes sont toutes en dessous de 0). De plus, en 2018, les LRMI des poissons appartenant au bassin nord sont en moyenne plus élevées que les LRMI des poissons du sud. Sur les autres années, cela semble plus aléatoire (Figure 15 (b)).

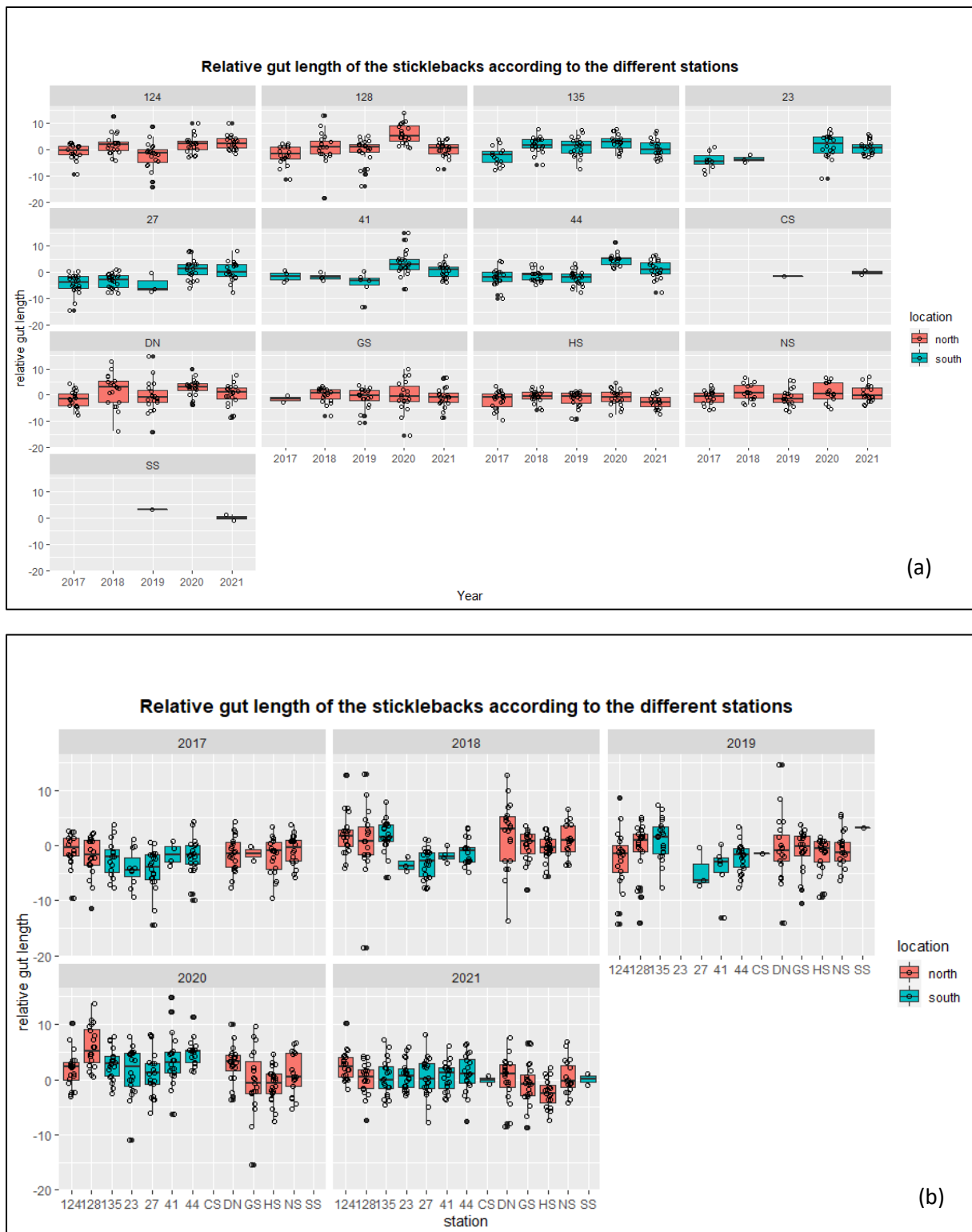


Figure 15 a) et b) : Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des stations du lac pour chaque année.

Bassins

En comparant par bassin (Figure 16), on retrouve à peu près les mêmes informations. Les longueurs relatives des intestins de l'année 2017 sont plus petites que les autres années. La LRMI du bassin nord est plus grande que celle du sud en 2017 et 2018 mais on remarque que c'est l'inverse qui se produit en 2020 et 2021.

Sur l'ensemble des années (Figure 17), il n'y a pas de différence notable entre les longueurs relatives des intestins du bassin Sud ou du bassin Nord. Mais on peut voir que les femelles ont une longueur relative d'intestin légèrement supérieure à celle des mâles.



Figure 16: Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des deux bassins du lac pour chaque année.



Figure 17: Longueur relative de l'intestin des poissons en fonction des deux bassins du lac.

Parasites

Le test ANOVA (cf Figure 12) a montré que la longueur de l'intestin des poissons n'était pas influencée par la présence de parasites. La figure 19 est en lien avec le résultat du test puisqu'elle montre qu'il n'y a pas de différence marquante dans la longueur relative des intestins entre les poissons parasités ou non-parasités. Que cela soit pour les mâles ou les femelles, les moyennes des longueurs relatives des intestins semblent égales.

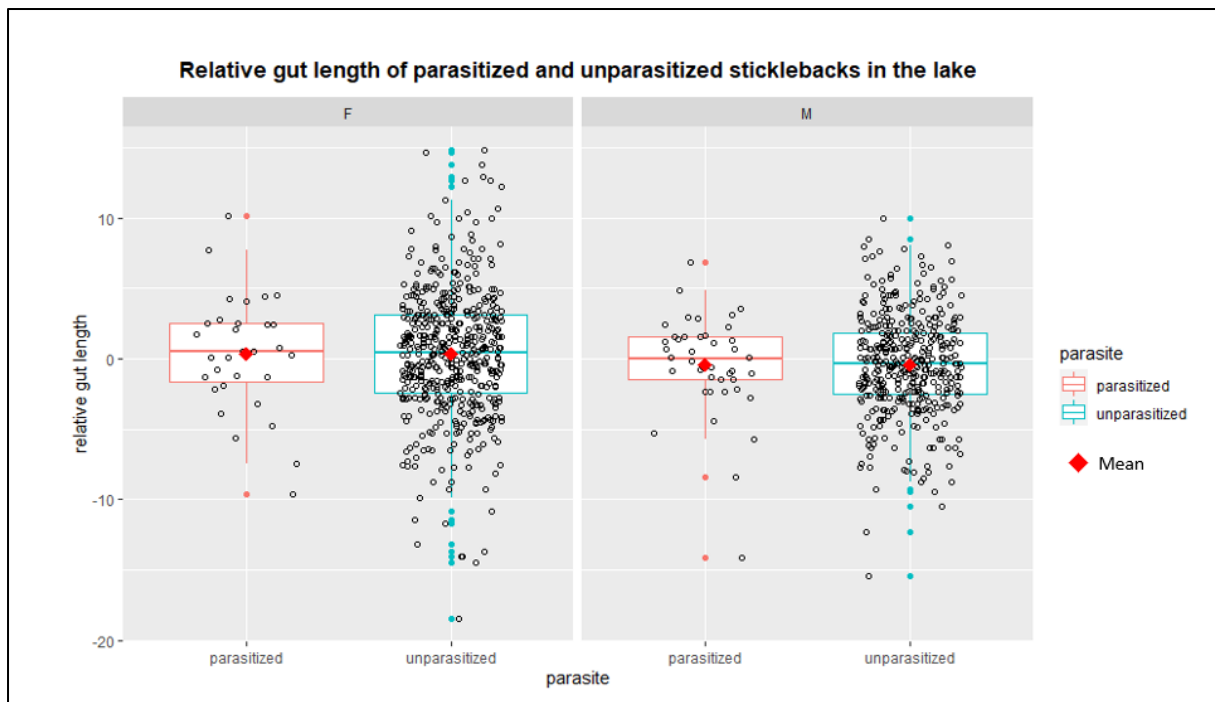


Figure 18: Longueur relative de l'intestin entre les poissons parasités ou non.

Discussions

Taille des poissons

Nous avons vu que la taille des poissons augmentait au fil des 5 années d'études avec une légère diminution en 2021. La taille est un facteur très important dans la longueur de l'intestin, ces deux derniers évoluent proportionnellement. Comme vu dans le tableau 2, la diminution de la taille des épinoches entre 2020 et 2021 n'est pas significative mais cela correspond au « crash » de la population de moucheron (*Chironomidae*) autour du lac Mývatn (Joseph Phillips, comm. pers.). Ces moucheron étant l'une des sources de nourriture principale des épinoches, il se pourrait qu'ils aient eu moins à manger et qu'en réponse, leur taille a diminué. Il serait donc intéressant de voir si cette diminution va continuer dans les prochaines années et si elle aura un réel impact sur la longueur des intestins.

Localisation

Les résultats sur la longueur des intestins des épinoches sur les 13 stations du lac Mývatn de 2017 à 2021 ont montré des similarités entre les stations du bassin Nord (124, 128, DN) et celles du bassin Sud (23, 27, 41 et 44). On pourrait penser que les phénotypes des épinoches évoluent de manière différente en fonction des deux bassins du lac. Cependant, la figure 17 nous a montré qu'il n'y

Il n'y a pas de différence majeure dans la longueur relative des intestins des poissons entre le bassin Nord et le bassin Sud. Au contraire, les différences seraient plus notables entre les différentes stations du lac (Figure 14 et 15(b)), ce qui signifie que le phénotype évoluerait plus localement. Il n'y a pas deux phénotypes distincts en fonction des deux bassins mais plutôt plusieurs phénotypes locaux qui évoluent en fonction de plusieurs paramètres environnementaux (températures, types de proies, prédation, etc...). Il peut être intéressant de procéder à une analyse et une comparaison génétique de ces mêmes poissons afin de vérifier si le même type de dynamique de variation est observé entre les deux bassins ou plutôt localement d'un point de vue génétique.

Ces variations entre les stations des deux bassins témoignent d'une différence d'environnement. En effet, selon Wagner et al. (2009), la longueur de l'intestin correspond à un compromis entre la maximisation de l'absorption des nutriments et de l'énergie des aliments et la minimisation de la demande énergétique des tissus digestifs. En outre, la longueur des intestins est corrélée au régime alimentaire du poisson et donc à la nourriture trouvée dans son environnement. Les bassins Nord et Sud auraient donc une composition différente en phytoplanctons et en invertébrés mais il y aurait aussi une composition différente de nourriture localement dans chaque bassin qui serait à l'origine des différences observées dans chaque station pour la longueur des intestins.

Sexe

En ce qui concerne la longueur des intestins liée au sexe, les résultats montrent que ce facteur joue bien un rôle et que les femelles ont une longueur d'intestin plus grande que les mâles, relativement à leur taille. D'après Wootton (1984), les femelles ont besoin de plus d'énergie que les mâles pour développer des gonades, il peut donc y avoir une augmentation des réserves d'énergie stockées dans le corps. Étant récoltées pendant la saison de reproduction, les femelles ont besoin de beaucoup d'énergie pour développer leurs œufs. Les femelles seraient donc amenées à manger plus et donc augmenter la taille de leur intestin.

Parasite

Les résultats de la longueur relative des poissons parasités ne montrent pas de différence entre ceux parasités et ceux qui ne le sont pas. L'hypothèse peut être rejetée, les poissons parasités n'ont pas de plus petits intestins que les poissons non-parasités. De plus, le test ANOVA nous précise qu'il n'y a pas de lien entre la longueur des intestins et le parasitisme. Cela signifie donc que le ou les parasites grandissent dans le corps du poisson sans pour autant affecter, en bien ou en mal, le développement de ses organes.

Néanmoins on a vu que sur les 968 épinoches récoltées sur les 5 années d'études, seulement 73 sont parasitées, ce qui représente moins de 10% de l'échantillon total. Il serait donc intéressant de faire la même étude mais avec plus de données sur le parasitisme (en utilisant les années précédentes ou les données prises pour les poissons capturés en août par exemple) afin de confirmer le fait qu'il n'y ait pas de lien ou au contraire voir une distinction dans la longueur des intestins entre les poissons parasités et non-parasités.

Générale

L'étude menée montre clairement que la longueur des intestins des poissons à travers le lac au cours de ces 5 dernières années est influencée par l'environnement dans lequel les poissons se trouvent.

Au cours du temps, les poissons ont adapté leur phénotype pour répondre aux changements environnementaux (prédiction, proies), cependant cette étude ne permet pas de savoir si cette adaptation est due seulement grâce à la plasticité des poissons ou est également causée par une évolution génétique. Le croisement de données génétiques avec ces données phénotypiques permettrait de déterminer le rôle de la génétique dans la variation de la morphologie trophique des épinoches au sein du lac.

Pour mieux comprendre la variation phénotypique des épinoches, il serait judicieux d'agrémenter la base de données avec des informations sur la dynamique des populations des autres espèces vivant au sein du lac telles que les oiseaux et les invertébrés. Ces derniers font partie intégrante de l'écosystème du lac et le fait de ne pas les intégrer dans cette étude entraîne une omission de certaines des informations notamment les interactions entre les espèces et leurs impacts, positifs ou négatifs, sur chacune d'entre elles.

Conclusion

Conclusion de la recherche

Ce projet a permis de mettre en évidence la divergence phénotypique qui règne dans la population d'épinoche à trois épines du lac Mývatn au cours de ces 5 dernières années. En effet, les résultats des observations menées ont confirmé l'hypothèse selon laquelle la longueur des intestins des poissons est corrélée à leur régime alimentaire et donc à l'environnement dans lequel ils se trouvent. Ils ont également mis en avant le dimorphisme qui existe entre les mâles et les femelles mais n'ont pas montré de différence entre les poissons parasités ou non. Ces informations permettent de comprendre davantage les processus et les interactions qui se déroulent au sein des épinoches et à travers le lac. Cependant, pour avoir une vision plus globale et plus précise de ces processus écologiques, il peut être nécessaire d'apporter plus de données (sur les parasites ou génétiques) et de compléter les analyses avec des données sur les autres espèces qui peuplent le lac afin de comprendre comment chaque population s'influence et impacte son environnement.

Cette étude ne s'intéressait qu'à la variation de la morphologie trophique des épinoches à trois épines du lac Mývatn mais s'insère dans un projet international sur les épinoches à trois épines. Ces expériences ont permis de fournir et de confirmer des informations sur les processus qui influencent l'évolution de la diversité biologique ainsi que le fonctionnement des écosystèmes naturels, qui font partie des objectifs de la recherche dans ce domaine.

Conclusion générale du stage

Pour finir, ce stage m'a permis d'intégrer un projet avec d'autres chercheurs, et de m'investir dans plusieurs activités, que ce soit sur le terrain pour la capture et l'échantillonnage des poissons, dans le laboratoire pour la création de la base de données ou bien dans l'analyse statistiques de mes données.

Je pense également avoir beaucoup progressé dans ma prise de décision scientifique avec la mise en place des essais, mes choix de mesures, mais également en statistique et en analyse de données en cherchant par moi-même les fonctions nouvelles que je devais utiliser pour avoir des résultats fiables. Enfin, il m'a permis de m'épanouir dans un nouveau pays, de sortir de ma zone de confort pour travailler et vivre dans un environnement nouveau.

Bibliographie

Gasterosteus aculeatus / DORIS. (s. d.). Consulté 15 juin 2022, à l'adresse

<https://doris.ffessm.fr/Especies/Gasterosteus-aculeatus-Epinoche-a-trois-epines-1449>

Hani, Y. M. I., Marchand, A., Turies, C., Kerambrun, E., Palluel, O., Bado-Nilles, A., Beaudouin, R.,

Porcher, J.-M., Geffard, A., & Dedourge-Geffard, O. (2018). Digestive enzymes and gut morphometric parameters of threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) : Influence of body size and temperature. *PLOS ONE*, 13(4), e0194932.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194932>

Hébert, F. O., Grambauer, S., Barber, I., Landry, C. R., & Aubin-Horth, N. (2017). Major host

transitions are modulated through transcriptome-wide reprogramming events in *Schistocephalus solidus*, a threespine stickleback parasite. *Molecular Ecology*, 26(4), 1118-1130. <https://doi.org/10.1111/mec.13970>

Karachle, P. K., & Stergiou, K. I. (2010). Gut length for several marine fish : Relationships with body length and trophic implications. *Marine Biodiversity Records*, 3, e106.

<https://doi.org/10.1017/S1755267210000904>

Kramer, D. L., & Bryant, M. J. (1995). Intestine length in the fishes of a tropical stream : 1.

Ontogenetic allometry. *Environmental Biology of Fishes*, 42(2), 115-127.

<https://doi.org/10.1007/BF00001990>

- Millet, A., Kristjánsson, B. K., Einarsson, Á., & Räsänen, K. (2013a). Spatial phenotypic and genetic structure of threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) in a heterogeneous natural system, Lake Mývatn, Iceland. *Ecology and Evolution*, n/a-n/a.
<https://doi.org/10.1002/ece3.712>
- Millet, A., Kristjánsson, B. K., Einarsson, Á., & Räsänen, K. (2013b). Spatial phenotypic and genetic structure of threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) in a heterogeneous natural system, Lake Mývatn, Iceland. *Ecology and Evolution*, n/a-n/a.
<https://doi.org/10.1002/ece3.712>
- Reynolds, J. D., Bell, M. A., & Foster, S. A. (1995). The Evolutionary Biology of the Threespine Stickleback. *The Journal of Animal Ecology*, 64(3), 418. <https://doi.org/10.2307/5902>
- Skúlason, S., Parsons, K. J., Svanbäck, R., Räsänen, K., Ferguson, M. M., Adams, C. E., Amundsen, P., Bartels, P., Bean, C. W., Boughman, J. W., Englund, G., Guðbrandsson, J., Hooker, O. E., Hudson, A. G., Kahilainen, K. K., Knudsen, R., Kristjánsson, B. K., Leblanc, C. A., Jónsson, Z., ... Snorrason, S. S. (2019). A way forward with eco evo devo : An extended theory of resource polymorphism with postglacial fishes as model systems. *Biological Reviews*, 94(5), 1786-1808. <https://doi.org/10.1111/brv.12534>
- Wagner, C. E., McIntyre, P. B., Buels, K. S., Gilbert, D. M., & Michel, E. (2009). Diet predicts intestine length in Lake Tanganyika's cichlid fishes : *Diet influences intestine length in cichlids*. *Functional Ecology*, 23(6), 1122-1131. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01589.x>
- Wootton, R. J. (1984). *A Functional Biology of Sticklebacks*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8513-8>

Annexes

Recording Done

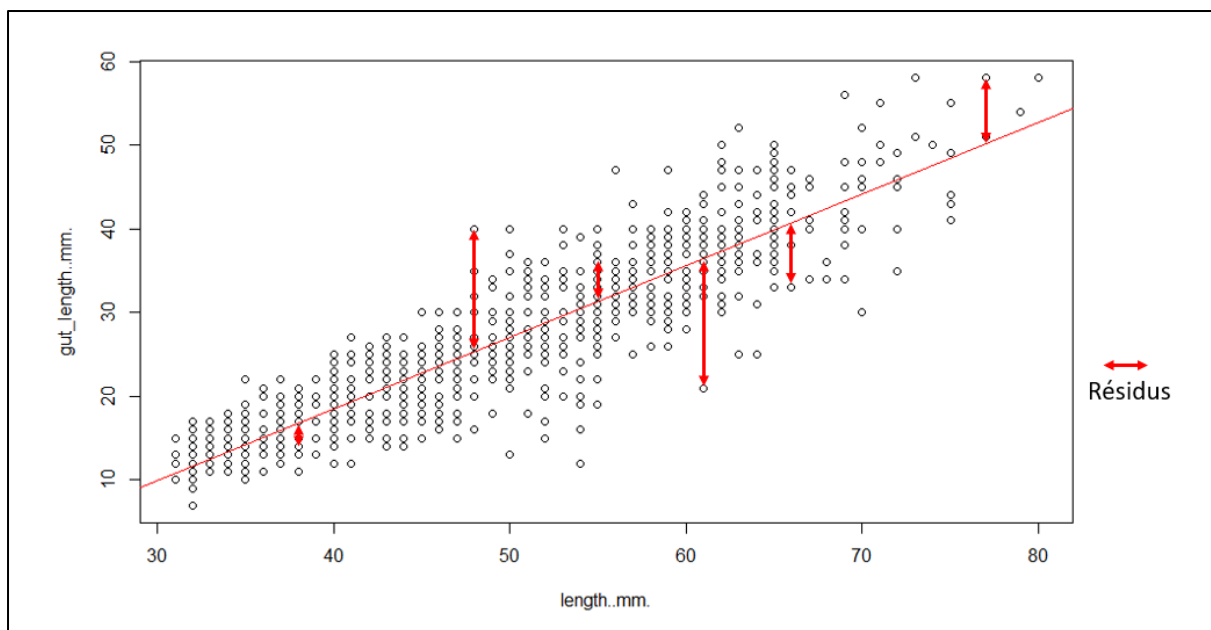
June 2021

Spatio-temporal phenotypic variation of stickleback: photograph and dissection

Name: Nathan

Date	fish id	length	weight	gut length	stomach	parasite (n)	parasite (weight)	eggs	sex	comments
5.7.21	8K104036	35	0.03	12	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	35	0.03	12	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	59	0.44	26	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	58	0.33	28	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	50	0.51	24	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	59	0.61	30	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	56	0.53	29	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	52	0.55	28	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	35	2.56	55	✓	✓	✓	✓	F	Egg: im
	8K104036	40	0.23	18	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	45	0.49	21	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	45	3.20	43	✓	5	0.32	✓	F	parasite cut in 2p
	8K104036	65	1.66	39	✓	1	0.14	✓	M	
	8K104036	64	1.89	37	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	55	0.85	34	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	53	1.20	36	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	57	0.96	29	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	60	1.46	38	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	37	2.20	44	✓	5	0.54	✓	F	
	8K104036	55	1.23	32	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	53	0.49	28	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	46	0.45	30	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	34	0.20	15	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	44	0.46	21	✓	1	0.09	✓	M	
6.7.21	8K104036	43	0.41	20	✓	2	0.09	✓	M	
	8K104036	42	0.38	22	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	57	1.21	35	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	52	0.35	29	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	52	1.00	29	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	61	1.32	38	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	65	2.00	38	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	31	0.03	13	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	36	0.23	21	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	33	0.24	20	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	48	0.33	25	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	56	1.23	30	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	33	0.20	14	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	38	0.11	21	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	58	1.13	33	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	36	0.16	20	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	50	0.56	28	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	52	0.33	30	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	20	2.20	45	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	63	2.05	42	✓	✓	✓	✓	F	
	8K104036	65	1.49	33	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	35	0.15	13	✓	✓	✓	✓	M	
	8K104036	40	0.30	22	✓	✓	✓	✓	F	

Annexe 1: Fiche de données



Annexe 2: Résidus du modèle linéaire afin de récupérer la longueur relative de l'intestin du poisson



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

REQUILLART
Nathan

2021-2022

Variation spatio-temporelle et impact des parasites
sur la longueur de l'intestin chez l'épinoche à trois
épines (*Gasterosteus aculeatus*) dans le lac Mývatn,
en Islande.

Résumé : Le lac Mývatn est l'un des écosystèmes les mieux étudiés d'Islande. Il présente de forts gradients environnementaux (température, substrat) et des différences spatiales et temporelles dans la composition des invertébrés. Ces derniers sont des proies importantes pour l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*). Les épinoches du lac Mývatn présentent des différences phénotypiques probablement en réponse aux proies et à la température. Dans ce cadre, des épinoches, capturées sur 5 ans à différents endroits du lac, ont été disséquées afin de mesurer la taille de leurs intestins. Les résultats soulignent l'impact du sexe, de l'environnement (proies, prédateurs, profondeurs, température) et des parasites sur la taille des intestins des épinoches du fait d'une variation de leur régime alimentaire.

Abstract: Lake Mývatn is one of Iceland's best-studied ecosystems. It exhibits strong environmental gradients (temperature, substrate) and spatial and temporal differences in invertebrate composition. These invertebrates are important prey for the Threespine Stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). Lake Mývatn sticklebacks exhibit phenotypic differences likely in response to prey and temperature. In this context, sticklebacks, captured over 5 years at different locations in the lake, were dissected to measure the size of their intestines. The results underline the impact of sex, environment (prey, predators, depths, temperature) and parasites on the size of stickleback intestines due to a variation in their diet.

Mots Clés : Epinoche, parasites, intestins, régime alimentaire, phénotype

Hólar university college
Háskólinn á Hólum
551 Sauðárkrókur Iceland

Superviseur : Bjarni K. Kristjánsson, Head of department

Tuteur académique : Catherine Boisneau

Tuteurs entreprise :

Joseph Phillips;
Post-doctoral

Ragna G.
Snorradóttir;
PhD student