
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Variations spatiotemporelles de la morphologie corporelle de multiples populations d'Ombles chevaliers (*Salvelinus alpinus*) issues de grottes volcaniques

Entreprise : Hólar University College

Adresse : 551 Sauðárkrókur kt. 500169-4359

Tuteur entreprise : Bjarni Kristófer
Kristjánsson, Professeur et responsable
du département d'aquaculture et biologie
des poissons

Clément Gardien

IMA

2018-2019

Tuteur académique : Catherine Boisneau

Remerciements

Dans un premier temps je souhaiterais remercier Mr. Bjarni Kristófer Kristjánsson, professeur et responsable du département d'aquaculture et de biologie des poissons de m'avoir accueilli au sein de l'université de Hólar et de son département.

Dans un deuxième temps je remercie à nouveau Mr. Bjarni Kristófer Kristjánsson et Mme. Camille Leblanc, professeur assistant, pour le temps qu'ils ont choisi de consacrer à l'encadrement et au bon déroulement de mon stage.

Je remercie également toutes les personnes présentes avec moi durant les deux campagnes de terrain, qui m'ont fait vivre des expériences inoubliables.

Et finalement, je tiens à remercier toute l'équipe et les personnes présentes au département d'aquaculture pendant la période de mon stage, aussi bien pour le très bon accueil qu'ils m'ont prodigué que pour l'atmosphère et le climat de travail qui régnait.

Sommaire

Remerciements.....	2
Sommaire.....	3
Listes des figures et tableaux.....	4
Introduction.....	5
1-Présentation du contexte.....	7
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil.....	7
1.2 Présentation du site d'étude.....	7
1.3 Présentation de la petite morphologie de l'omble chevalier benthique.....	9
2-Matériels et méthodes.....	10
2.1 Matériels et méthodes réalisés sur le terrain.....	10
2.1.1 Méthodes de capture.....	10
2.1.2 Collecte des variables écologiques.....	11
2.2 Analyses statistiques de la morphologie.....	12
2.2.1 Création de la base de données.....	12
2.2.2 Analyse procustéenne généralisée.....	14
2.2.3 Analyse de la variance (ANOVA) et régression.....	15
3- Résultats et interprétations.....	16
3.1 Résultats des campagnes de terrain.....	16
3.2 Résultats des analyses statistiques.....	17
Conclusion.....	18
Bibliographie.....	19

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1 : Carte de l'Islande.....	7
Figure 2 : Carte du lac Mývatn et localisation des grottes (Via GoogleEarth et Arcmap).....	8
Figure 3 : Exemples de grottes volcaniques à Haganes	9
Figure 4 : Exemple de pièges à viron.....	10
Figure 5 : Exemple du matériel pour l'échantillonnage du benthos.....	11
Figure 6 : Exemple de mise en place des 21 points de repère via tpsDig.....	12
Figure 7 : Exemple de fichier script pour un individu.....	13
Figure 8 : Schéma des étapes de l'analyse procustéenne généralisée.....	14
Figure 9 : Analyse procustéenne généralisé de la grotte n°1 de l'année 2018 à partir de TpsRelw.....	15

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description du positionnement des points de repère sur les photos issues de la base de données	13
Tableau 2 : Tableau 2 : Résultats des collectes du mois de Juin.....	16
Tableau 3 : Récapitulatif du nombre de capture en fonction de la méthode pour la première semaine.....	17
Tableau 4 : Récapitulatif du nombre de capture en fonction de la méthode pour la deuxième semaine.....	17

Introduction

L'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) fait partie des cinq espèces communes de poissons d'eau douce en Islande avec le saumon Atlantique (*Salmo salar*), l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*), l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) et la truite commune (*Salmo trutta*). Ce faible nombre d'espèce est notamment dû à l'isolement géographique de l'Islande depuis la dernière ère glaciaire (Skúli Skúlason et al., 1992). Particulièrement bien adaptés aux eaux froides, les ombles ont une croissance supérieure aux autres poissons tels que les saumons dans des eaux à faibles températures (Berg et Jonsson, 1989) ; ce qui en fait une espèce bien acclimatée aux conditions environnementales locales (Skúli Skúlason et al., 1992). Ils sont présents aussi bien dans les rivières avec un cycle de vie anadrome que dans les lacs. Plusieurs populations d'ombles chevaliers vivent en sympatrie (plusieurs populations différentes qui coexiste dans une même zone géographique), tout en présentant des morphologies différentes. Ces dernières représentent des adaptations à l'écologie locale et à leurs milieux de vie (Hindar et al., 1986 ; Snorrason et al., 1989), comme notamment l'évolution de la forme de la bouche en fonction du régime alimentaire du poisson. Ces variations phénotypiques, sont le résultat de plasticité au cours du développement, du polymorphisme et ou de la différenciation génétique (Nordeng, 1983 ; Vrijenhoek et al., 1987).

Aussi c'est dans ce contexte que depuis 2012, les chercheurs de l'Université de Hólar réalisent un projet de suivi sur des populations d'ombles chevaliers dans des grottes volcaniques à proximité du lac Mývatn dans le nord-est de l'Islande. L'objectif de cette étude est d'arriver à faire un lien entre l'évolution phénotypique des populations d'ombles chevaliers avec les facteurs écologiques présents dans les grottes ; ceci tout en maintenant et développant la diversité des populations (Leblanc, 2016). L'omble chevalier est un choix idéal pour ce type d'étude puisqu'il possède une des plus grandes variations phénotypiques parmi les vertébrés (Klemetsen, 2013 ; voir ci-dessus) et compte plusieurs morphologies. Parmi celle-ci se trouve une morphologie de petit omble chevalier benthique, qui est principalement présent chez les populations occupant les champs de laves récents et se trouvant le long de zone volcanique active. Ces populations se trouvent dans des lacs ou des rivières alimentées par des sources froides percolant à travers le champ de lave. Ces milieux sont caractérisés par un régime hydrique et une température relativement stable et riche en nutriments (Kristjánsson, 2005). Les différentes populations de ces petits ombles chevaliers benthiques à travers l'Islande présentent de légères différences phénotypes entre elles (Kristjánsson, 2018) et sont caractérisées par une pedomorphie ; c'est-à-dire qu'elles ont gardé au stade adulte des caractéristiques juvéniles. Cette morphologie particulière de l'omble chevalier peut être trouvé dans les grottes volcaniques proches du lac Mývatn. Pour la plupart non connectées entre elles, ces grottes sont particulièrement intéressantes car elles présentent des populations presque uniques (Leblanc et al. unpublished data), qui ont l'avantage d'être proches géographiquement entre elles tout en présentant des différences phénotypiques.

Ainsi les chercheurs de l'Université de Hólar ont sélectionné dans une vingtaine de grottes seize populations isolées et indépendantes les unes des autres. Un programme de monitoring de ces populations sur plusieurs années est mené afin de pouvoir suivre au mieux leurs évolutions. Ce programme se divise en plusieurs campagnes de terrain chaque année. Le but de ces campagnes sera de collecter un maximum d'individus suivi par le biais de micro-puce, ainsi que récupérer des données de variables écologiques présentes dans les grottes. Par la suite ces données sont utilisées pour réaliser diverses analyses afin de répondre à l'étude. Celles-ci se découpent en trois parties distinctes : La première, basée sur l'étude de la variation des phénotypes en fonction de l'espace et du temps en lien avec les facteurs écologiques des grottes. L'hypothèse principal est, qu'il y a une relation entre les facteurs écologiques présents dans les grottes sur le phénotype des ombles, et notamment sur la

forme générale du corps, les organes sensoriels ou encore la couleur du corps (Leblanc, 2016). Les facteurs écologiques comme la taille des grottes, la disponibilité en nourriture et la température de l'eau sont ceux attendus avec le plus fort impact sur les phénotypes. La seconde partie est d'étudier l'influence du phénotype et des facteurs écologiques des grottes sur la fitness des ombles chevaliers (Leblanc, 2016). C'est-à-dire étudier la capacité des individus à se reproduire, survivre en fonctions de leurs phénotypes et des facteurs écologiques. La troisième partie étudie les processus de microévolution, dérive génétique et sélection naturelle. Cette partie a pour but de déterminer le rôle de l'adaptabilité, consanguinité et dérive génétique sur la variation phénotypique dans des petites populations (Leblanc, 2016).

Plusieurs études ont déjà été menées, permettant de montrer qu'il y a bien une variation significative de la forme générale du corps des ombles chevaliers entre les grottes et les années (Birault, 2017). De plus les résultats ont également montré que ces variations moyennes dans la forme du corps des poissons prenaient une direction différente entre les grottes et les années. Même les grottes physiquement et génétiquement connectées différaient dans la forme du corps des poissons. Les poissons sont plus fins à des températures annuelles basses, dû à un ralentissement de leur métabolisme entraînant une diminution de leurs consommations de nourriture (Birault, 2017). Mon travail durant ce stage est en lien avec ces résultats et le premier objectif cité ci-dessus. Il consistera premièrement dans l'étude des variations moyennes de la forme générale des ombles chevaliers dans l'espace (ici les grottes) ainsi que dans le temps (entre différents mois et années). Dans un deuxième temps je testerai si un changement de morphologie s'opère en réponse à des changements dans l'écologie (paramètres physico-chimiques de l'eau ou encore la disponibilité et la qualité en nourriture du milieu) et la morphologie des grottes elles-mêmes.

La première partie de ce rapport introduira succinctement l'organisme d'accueil de ce stage, le site d'étude et les techniques employées pour décrire la morphologie d'omble chevalier étudiée. La seconde partie présentera tout le matériel ainsi que la méthode utilisée pendant les phases de collectes des données ainsi que l'obtention des résultats. Suivra une mise au jour des résultats obtenus des campagnes de terrain et analyses statistiques.

1-Présentation du contexte

1.1-Présentation de l'organisme d'accueil (D'après www.holar.is)

Ce stage s'est réalisé au sein du Hólar University College, situé dans la vallée de Hjaltadalur dans la municipalité de Skagafjörður en Islande (Figure 1). Cette dernière se trouve à 380km de Reykjavík la capitale du pays, la ville la plus proche est Sauðárkrúkur (32km).

Le mot Hólar signifie colline en Islandais. L'école fut fondée en 1106 par l'évêque Jón Ögmundsson en même temps que sa cathédrale, de ce fait Hólar University Collège est une des plus vieilles écoles d'Europe. Cette ville a joué un rôle capital dans l'histoire de l'Islande et a été le dernier bastion catholique islandais jusqu'en 1550 tout en restant un centre d'apprentissage important en Islande. De nos jours, l'école de Hólar est passée d'une école d'agriculture conventionnelle à une institution moderne de niveau supérieur et compte aujourd'hui près de 300 étudiants.



Figure 1 : Carte de l'Islande (d'après www.visitskagafjordur.is (modifié))

Cette université est composée de trois départements, le plus important sur l'étude des Sciences équidés, le second sur le tourisme rural et enfin le dernier sur l'aquaculture et la biologie des poissons. C'est au sein de ce dernier département que j'ai réalisé mon stage. L'objectif de ce département est de « rassembler et de diffuser des connaissances dans les domaines de la biologie aquatique, l'aquaculture et la biologie des poissons » (Hólar University College, 2017). Ce département a la particularité d'être localisé dans la ville de Sauðárkrúkur et possède un espace de travail ainsi que des installations d'élevages de poissons. L'équipe est composée de chercheurs, techniciens, employés administratifs et d'étudiants islandais et internationaux validant leurs masters, doctorats ou stages.

1.2-Présentation du site d'étude

Le site d'étude où a été effectué la partie de collecte des données est le lac Mývatn situé au Nord-Est du territoire. Mývatn signifie le lac des mouches en islandais en raison du très grand nombre d'insectes sur les bords du rivage en été. C'est le troisième plus grand lac d'Islande avec sa superficie de 37km². Formé il y a 2300 ans à la suite d'une éruption volcanique majeure (Thorarinsson 1951 ; Einarsson 1982 ; Sæmundsson 1991), il se compose aujourd'hui de deux grands bassins (Figure 2). Le bassin Nord d'une superficie de 8.5km² et d'une profondeur variant de 2 à 5.5 mètres, et le bassin Sud avec une superficie de 29.2km² et une profondeur de 3 à 4 mètres (Einarsson et al, 2004). Le lac est principalement alimenté par des sources provenant de la côte Est, qui sont à une température moyenne de 5°C ainsi que quelques sources plus chaudes (jusqu'à 30°C) dans le bassin Nord (Ólafsson 1979a). Il se déverse dans la rivière Laxá qui rejoindra l'Océan Arctique 61km en aval. Le lac Mývatn ainsi que la rivière Laxá sont tous deux classés en zone de réserve naturelle depuis 1974 et sont considérés comme site Ramsar depuis 1978 (Einarsson, 2004b). Une autre particularité de ce lac est le

fait qu'il est gelé environ 190 jours par an rendant ainsi le milieu très spécifique pour les espèces vivantes en son sein. Ce lac est caractérisé par une très forte production primaire et secondaire. Cette dernière est principalement due au très grand nombre de chironomidae présent. Majoritairement du genre *Tanytarsus* ces insectes ont des grandes variations de populations d'une année à l'autre en fonction de l'abondance ou non de leurs prédateurs comme l'omble chevalier (Eirnasson, 2004a).

D'un point de vue de l'ichtyofaune le lac est majoritairement composé d'épinoches (*Gasterosteus aculeatus*) qui ont un cycle de vie de deux ans avant de mourir (Gudmundsson, 1996) et sur lesquels plusieurs études de suivi sont effectuées. Et de quelques espèces en plus faible effectifs comme l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) qui sera présenté plus en détails dans la partie qui suit ainsi que des truites communes (*Salmo trutta*) faiblement présentes. Ce lac est également entouré de nombreuses grottes formées par la lave ; ce sont des lieux d'habitats pour les populations d'omble chevalier. Aussi c'est dans ce cadre qu'est réalisé par les chercheurs de Hólar University College plusieurs fois par an aux mois de Juin et d'Aout le dénombrement des populations et le relevé de paramètres écologiques dans vingt-cinq grottes (Figure 3). Neuf de ces grottes sont situées sur la partie Nord-Ouest du bassin Sud à Vindbelgur, et les seize autres à l'ouest de ce même bassin à Haganes. Ces grottes sont complètement fermées en hiver à cause de la neige qui obstrue les ouvertures, mais ces ouvertures sont visibles et connectées à l'air libre en été, permettant la production primaire ainsi que l'apport de nourriture d'origine terrestres. Principalement alimentées par des eaux souterraines, les conditions du milieu sont très stables avec une température moyenne d'environ 6.7°C, un pH de 8.7, une conductivité de 121 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un taux de CO_2 dissous de 7,6 mg/L et une turbidité de 9 NTU maximum (Chevalier, 2016). Cependant ces paramètres varient faiblement au cours de l'année et d'une grotte à l'autre.

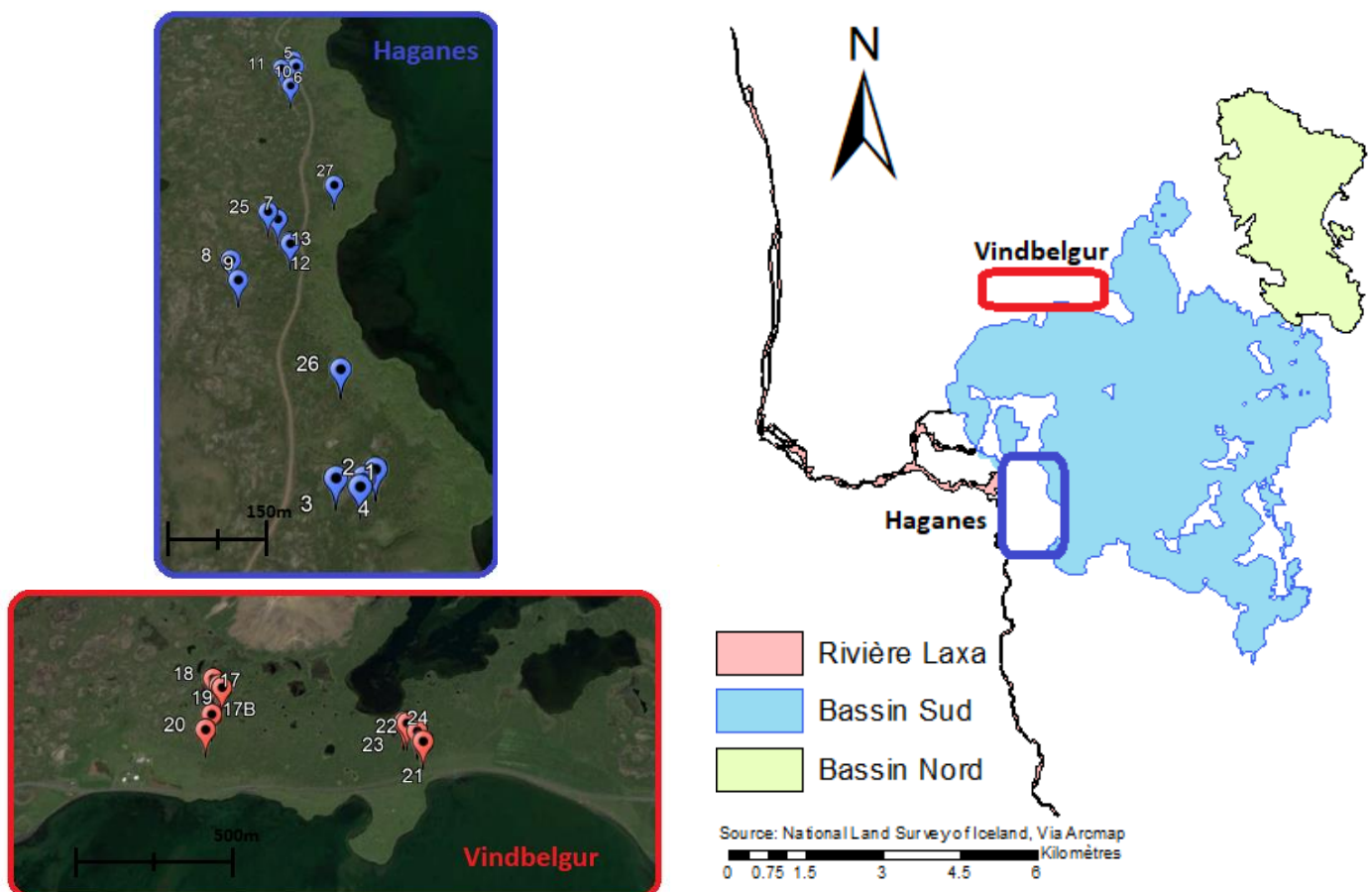




Figure 3 : Exemples de grottes volcaniques à Haganes

1.3-Présentation de la petite morphologie de l'omble chevalier benthique

L'omble chevalier de la famille des Salmonidés est une espèce très présente dans le nord de l'Islande. Elle est principalement retrouvée dans des eaux froides tels que les lacs formés par la fonte des glaces ou encore les eaux subarctiques côtières. Cette espèce se nourrit généralement de pupes, larves de chironomidae, cladocères et d'autres poissons pour les formes piscivores.

Il est principalement caractérisé par sa grande diversité morphologique, qui peut être très variable même sur une faible zone géographique faible. Cette caractéristique est si importante que certains chercheurs en sont venus à qualifier son polymorphisme par le terme « the charr problem » (Klemetsen, 2010) ou encore le qualifier comme étant le plus variable de tous les vertébrés (Johnson, 1980). Aussi en Islande de nombreuses zones voient coexister plusieurs populations d'ombles chevaliers de morphologies différentes. Par exemple le lac Thingvallavatn d'une superficie de 87km² abrite quatre morphologies différentes à savoir la morphologie planctivores, piscivores, large benthique et petit benthique (Jonsson et al., 1988). Les morphologies benthiques vivent généralement près du littoral et se nourrissent d'invertébrés aquatiques. Leur corps a tendance à être trapu avec de longues nageoires pectorales et une bouche subterminale (Skúlason et al., 1989).

Pour le lac Mývatn plusieurs morphologies d'ombles chevaliers sont également représentées. Dans les grottes volcaniques autour du lac, c'est la petite morphologie benthique de l'omble chevalier qui est présente. Elle est caractérisée par un corps trapu, robuste, des yeux plus larges que la moyenne, une bouche subterminale ainsi qu'une coloration sombre (Kristjánsson, 2005). Les marques subterminale de la bouche ainsi que les points sombres sur les flancs des poissons indique que cette espèce est pedomorphe et par conséquent a conservé des caractères juvéniles. Il n'est pas rare de voir des adultes matures de seulement 8cm (Kristjánsson et al., 2012). Cette morphologie particulière serait probablement causée par l'adaptation au milieu de vie très spécifique que sont les grottes volcaniques immergées. Cependant même au sein de ces différentes populations de petit ombles chevaliers benthiques, des différences d'évolution et de morphologies sont présentes. En effet dans sa publication de 2012, Kristjánsson a montré à partir d'une trentaine de populations différentes de petits ombles chevaliers benthiques en Islande, que chaque population avait avec une morphologie qui différait. De plus il a ressorti qu'il y a un phénomène d'évolution parallèle, puisque toutes les populations évoluent dans le même sens face à un problème naturel mais avec des vitesses d'évolution différentes. En outre d'après ces travaux l'omble chevalier issue des grottes de Mývatn possède une morphologie qui tend comme étant le plus éloigné d'une morphologie benthique caractéristique, par rapport à toutes les autres populations étudiées.

2-Matériels et méthodes

Depuis 2012, l'Université de Hólar réalise des études sur la morphologie des populations d'ombles chevaliers présents dans les grottes volcaniques. Ces études se traduisent par plusieurs campagnes de terrain qui se déroulent deux semaines en Juin et deux autres semaines en Août. L'objectif de ces campagnes est de capturer un maximum d'ombles chevaliers afin de pouvoir enrichir les bases de données via des mesures biométriques et suivre au mieux l'évolution des populations. Durant mon stage j'ai eu la chance de participer aux deux campagnes de Juin 2019, qui se sont déroulées du lundi 3 au jeudi 6 Juin et du lundi 17 au jeudi 21 Juin respectivement.

2.1-Matériels et méthodes réalisé sur le terrain

2.1.1-Méthodes de capture

Durant les années précédente, il s'est avéré que deux pêches séparées de plusieurs semaines étaient plus efficaces que plusieurs répétées à la suite durant le même jour. Aussi deux campagnes se déroulent au mois de juin pour le début de l'été et deux autres en août pour la fin de l'été. Afin de pouvoir capturer un maximum de poissons, plusieurs systèmes ont été mis en place. D'une part la pose de pièges à vairon (figure 4) ; son principe repose sur une cage cylindrique faite de grillage fin avec à chaque extrémité une ouverture en forme de tunnel en entonnoir, ainsi le poisson peut facilement entrer dans le piège mais très difficilement en sortir. Et d'autre part par la pose de pièges à anguilles. Ces pièges sont posés la veille de la pêche électrique pour au moins douze heures. Le nombre des pièges dans chaque cave dépend de la taille de la cave ainsi que du nombre de pièges disponibles. Passée la nuit, les pièges sont retirés de l'eau et une pêche électrique est réalisée afin d'être sûr de pouvoir capturer un maximum de poissons, l'objectif étant de capturer tous les poissons présents dans chaque grotte. Pour cela à l'aide d'un groupe électrogène, une cathode et une anode sont disposées dans la cave et délivrent un courant de 300 V avec une intensité allant de 0.1 à 0.6A (Chevalier, 2016), permettant de paralyser les poissons présents et de les capturer facilement, puisque le champ électrique tétanise de manière temporaire les muscles des poissons. Cette méthode de piège pendant la nuit puis de pêche électrique par grotte permet d'optimiser la capture des poissons, qui seront collectés et mis dans un seau avec de l'eau fraîche et oxygénée en attendant d'être mesurés.



Figure 4 : Exemple de pièges à vairon

Les poissons ont été anesthésiés à l'aide du 2-phénoxyéthanol à une concentration de 300ppm (3mL dans 10L) pour être manipulés. Ensuite ils sont pesés, mesurés et pris en photo sur le flanc gauche pour chaque poisson ayant une taille supérieure ou égale à 45mm. Ces photos serviront à alimenter la base de données collectées depuis 2012. Chaque poisson est également scanné afin de savoir s'il présente ou non une micro-puce implantée les années précédentes permettant d'avoir un suivi de chaque poisson d'une année ou saison à l'autre. Si elle est présente, le poisson est identifié par son numéro, autrement une micro-puce est introduite dans la cavité abdominale du poisson. Une partie de la nageoire caudale supérieure est également sectionnée pour faire des analyses d'ADN.

2.1.2-Collecte des variables écologiques

Afin de collecter les variables écologiques, chaque grotte est munie d'un HOBO data logger (UA-002-64, ONSET Corporation), qui est un petit appareil pouvant enregistrer jusqu'à 52 000 mesures en 10-bit (d'après ONSET Corporation). Ces data loggers enregistreront les variations de température (°C) et de lumière (LUX) 4 fois par jour toute l'année. Ainsi à chaque passage dans les grottes ce data logger est collecté et ses données sont transférées sur ordinateur pour être plus tard exploitées.

En plus de la capture des poissons présents dans chaque grotte, durant la première campagne est prélevé un échantillon du benthos qui désigne l'ensemble des organismes végétaux et animaux vivants sur ou dans le substrat. Le but de cette récolte est de caractériser les proies disponibles pour le poisson pendant la période de collecte et faire un lien entre la croissance des populations d'ombles chevaliers présents dans les grottes et la nourriture disponible. Pour cela trois pierres par grotte sont prélevées à proximité et mis dans une cuve remplie d'eau claire. Par la suite chacune des pierres est brossée sur toutes ces faces afin de détacher un maximum d'organismes. L'eau est passée dans un tamis (maille de 125 μ m) afin d'isoler les organismes. Finalement le tamis sera rincé avec un peu d'eau qui ne contient aucun microorganisme, et cette eau de rinçage contenant tous les microorganismes de 125 μ m et plus, est récoltée dans des boîtes en plastique (Figure 5). Par la suite une photo de la pierre échantillonnée est prise dans la position exacte où cette dernière a été sortie de l'eau avec une étiquette contenant la grotte et l'ouverture de prise d'échantillon ainsi que le numéro de la pierre. Une fois la photo prise, les pierres sont remises à l'eau à l'endroit du prélèvement et l'étiquette est mise dans la boîte en plastique et complétée avec de l'éthanol à 70%. Par la suite les échantillons seront analysés et caractérisés en laboratoire pour déterminer les densités d'espèces principales ou totales par m².



Figure 5 : Exemple du matériel pour l'échantillonnage du benthos

Chaque cave est également pourvu d'un ou plusieurs pièges qui capture les matériaux terrestres qui tombent dans la grotte. Ces pièges contiennent moitié d'eau et moitié de propylène glycol avec un peu de savon pour permettre une bonne conservation des insectes qui peuvent tomber dedans. Durant la deuxième semaine de terrain du mois de Juin ces pièges ont été récoltés et changés jusqu'au mois d'Aout, pour être analysés. Durant cette semaine a également été collecté les paramètres chimiques de chaque cave à l'aide d'une sonde indiquant la température(°C), pH, turbidité (NTU), oxygène dissous (mg/L) et la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

2.2-Analyse statistique de la morphologie

Cette partie a pour objectif de décrire toutes les étapes permettant la caractérisation de la morphologie corporelle des ombles chevaliers.

2.2.1-Création de la base de données

Dans le cadre de cette étude, les photos des poissons collectées en 2017 et 2018 seront exploitées. La première partie de l'étude consistera à faire une analyse de la morphologie des poissons afin de déterminer la variation morphologique entre toutes les populations. L'ensemble des photos présent sur le terrain ont été classées par grottes, avec la même orientation et les dupliqua ont été supprimées. A partir du logiciel tpsUtil un fichier type .tps est créé permettant l'utilisation d'autres logiciels de morphométrie. Ensuite des points de repères sont placés via le logiciel tpsDig sur chacune des photos. Ces derniers correspondent à un point représenté par deux coordonnées (x,y), permettant de décrire la forme du corps du poisson (Figure 6).

Il a été défini préalablement, que chaque poisson serait représenté par 21 points de repères (Tableau 1), permettant de qualifier sa forme générale au plus juste. TpsDig permet à l'utilisateur de placer à partir d'une photo des points aux endroits les plus pertinents (nageoire, bouche, œil etc...) qui décriront la forme du corps du poisson et permettront ainsi d'obtenir un fichier en format txt avec les coordonnées de chaque points placés (Figure 7).

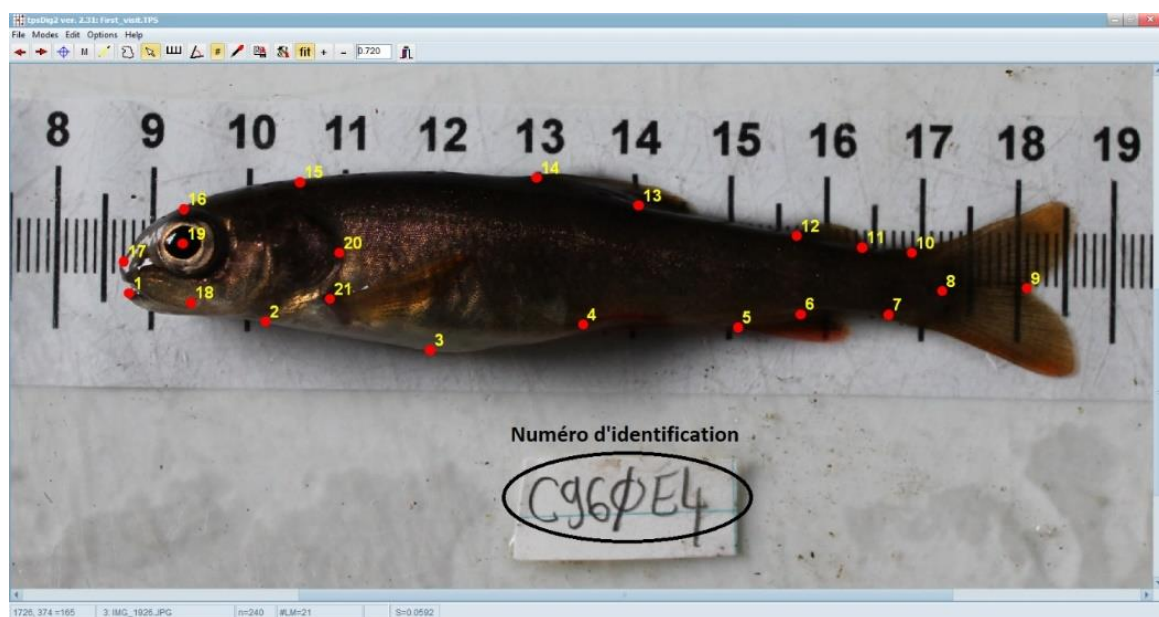


Figure 6 : Exemple de mise en place des 21 points de repères via tpsDig

Tableau 1 : Description du positionnement des points de repère sur les photos issues de la base de données

Points de repère	Description
1	Extrémité inférieure de la bouche
2	Point ventral de l'opercule
3	Pointa égales distances entre le point de repère 2 et 4
4	Insertion antérieure de la nageoire pelvienne
5	Insertion antérieure de la nageoire anale
6	Insertion postérieure de la nageoire anale
7	Insertion ventrale de la nageoire caudale
8	Point postérieur au niveau de la ligne latérale
9	Fourche de la nageoire caudale
10	Insertion dorsale de la nageoire caudale
11	Insertion postérieure de la nageoire adipeuse
12	Insertion antérieure de la nageoire adipeuse
13	Insertion postérieure de la nageoire dorsale
14	Insertion antérieure de la nageoire dorsale
15	Limite postérieure de la tête
16	Haut du crâne au niveau de l'œil
17	Haut du
18	Terminaison postérieure de la bouche
19	Centre de l'œil
20	Point le plus incurvé de l'opercule
21	Insertion antérieure de la nageoire pectorale

LM=21

1446,00000 1844,00000
1620,00000 1795,00000
1863,00000 1778,00000
2076,00000 1799,00000
2303,00000 1818,00000
2437,00000 1856,00000
2522,00000 1867,00000
2565,00000 1906,00000
2757,00000 1895,00000
2518,00000 1955,00000
2435,00000 1963,00000
2379,00000 1968,00000
2178,00000 1983,00000
2008,00000 2009,00000
1630,00000 1986,00000
1522,00000 1949,00000
1455,00000 1902,00000
1487,00000 1825,00000
1529,00000 1899,00000
1742,00000 1895,00000
1744,00000 1838,00000
IMAGE=0216.tif
ID=CAL18-3579
SCALE=0,048057

1

2

3

4

5

- 1 Nombre de landmark
- 2 Coordonnées des landmarks (x,y)
- 3 Nom source de l'image
- 4 Identifiant du poisson
- 5 Facteur de conversion d'échelle

Figure 7 : Exemple de fichier script pour un individu

2.2.2-Analyse procustéenne généralisée

La base de données produite n'est pas encore exploitable puisque chaque spécimen a une échelle et une orientation qui lui est propre. Aussi afin de contrer ce problème on applique une analyse procustéenne généralisée. Le but est de calculer la forme moyenne des poissons. Pour cela chaque point de repère se voit attribuer un centroïde qui correspond à la racine carrée de la somme des distances au carré entre tous les points (Mitteroecker *et al.*, 2013). Ces centroïdes sont souvent utilisés pour la géométrie morphologique et ont une corrélation avec la forme (Bookstein, 1991).

Nous avons k points qui ont une coordonnée x et y associées avec k=nombre d'individu. A chaque point il y a : ((x1,y1),(x2,y2),...(xk,yk))

La moyenne des x et des y est en premier lieu calculée pour chaque point de repère :

$$= \frac{x1 + x2 + \dots + xk}{k} \quad \frac{y1 + y2 + \dots + yk}{k}$$

Ensuite une translation, rotation et uniformisation d'échelle va être effectuée sur chaque individu (figure X) de la matrice pour pouvoir les comparer.

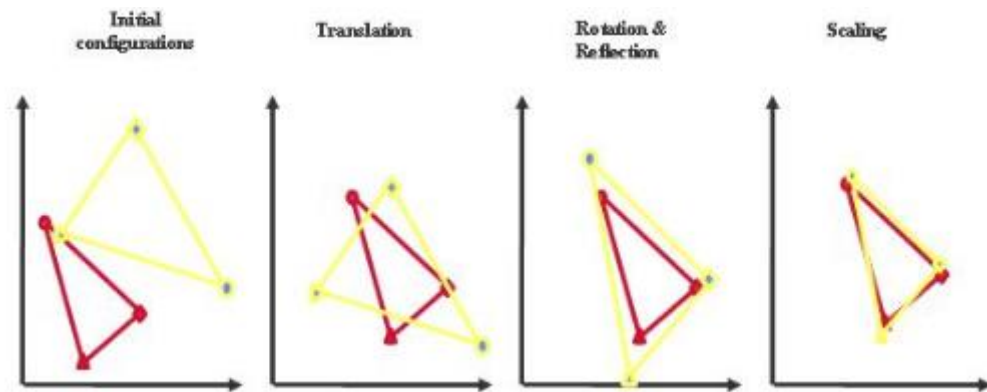


Figure 8 : Schéma des étapes de l'analyse procustéenne généralisée (d'après The Society of Sensory Professionals)

Et permettra de calculer les centroïdes (c) qui correspondent à la forme moyenne.

$$c = \sqrt{(x1 - \bar{x})^2 + (y1 - \bar{y})^2 + \dots + (xk - \bar{x})^2 + (yk - \bar{y})^2}$$

Ces centroïdes seront utilisés comme référence pour la mise en forme à la même échelle de chaque point.

$$\frac{(x1 - \bar{x})}{c}, \frac{(y1 - \bar{y})}{c}, \dots, \frac{(xk - \bar{x})}{c}, \frac{(yk - \bar{y})}{c}$$

Tout ce processus de calcul peut être réalisé à l'aide du logiciel tpsRelw ainsi que du logiciel R. L'exemple présenté ci-dessous est réalisé avec le logiciel tpsRelw, car il présente une simplicité d'exécution mais surtout un rendu avec très bonne compréhension visuelle. L'intégralité des données seront analysées avec le logiciel R, puisque ce dernier permet d'effectuer les analyses statistiques à partir des centroïdes obtenus durant cette opération.

L'exemple ci-dessous (Figure 9) traduit l'analyse procustéenne réalisée sur la cave 1 de l'année 2018 avec les points remplis qui représentent les centroïdes calculés.

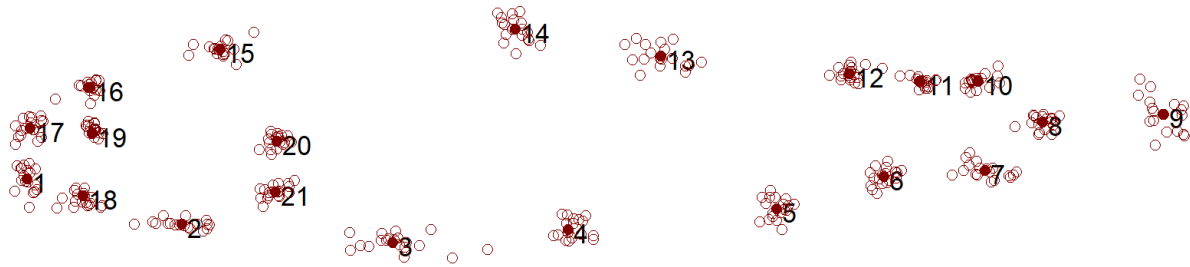


Figure 9 : Analyse procustéenne généralisé de la grotte n°1 de l'année 2018 à partir de TpsRelw

2.2.3- Analyse de la variance (ANOVA) et régression

Maintenant que la base de données est correctement construite et prête à être utilisée, des analyses de variance et régression vont être effectuées depuis R Studio.

Le but de cette étape sera de déterminer si un facteur a un impact sur la forme générale du corps. Pour cela un test ANCOVA (Analyse de la Covariance) sera réalisé. Ce test statistique est un test ANOVA (Analyse de la variance) avec l'ajout d'une covariable. Il permet de déterminer les effets de plusieurs variables sur une autre variable indépendante appelé covariable. Cette dernière représente un paramètre qui va varier entre chaque poisson mais qui ne doit pas être analysés. Dans notre cas et comme pour de très nombreuses études de morphologies la covariable sera la taille des poissons, puisque comme dit plus haut, la taille de chaque poisson est différente. Les variables seront les différents paramètres écologiques que nous souhaitons étudier. Les résultats de ce test permettront de dire à combien de pourcent une variable donc un paramètre écologiques définie explique la variation de la covariable donc la forme chez les individus.

3- Résultats et interprétations

3.1-Résultats des campagnes de terrain

Cette partie présente de manière succincte les résultats des deux campagnes de terrains réalisées en juin 2019 (Tableau 2) ; ces données iront rejoindre la base de données créée depuis 2012. Pour le mois de juin 2019 le nombre total de poisson capturé s'élève à 845 poissons. 93 d'entre eux n'ont pas été enregistré puisque leurs tailles étaient inférieures à 45mm. 205 et 99 nouveaux poissons ont été enregistré pour la semaine 1 et 2 respectivement. Le taux de recapture d'une semaine à l'autre est de 32.99% ce qui montre bien l'efficacité d'effectuer deux pêches espacées de plusieurs semaines.

Tableau 2 : Résultats des collectes du mois de Juin

Grottes	Nombre de poissons	
	1ère semaine	2ème semaine
1	15	7
2	19	16
5	32	31
6	2	3
7	21	24
10	19	18
11	17	18
12	8	6
17	4	6
17B	15	9
18	15	22
19	15	19
20	26	20
21	29	21
22	17	7
23	15	20
24	4	3
25	120	79
26	27	38
27	34	24

Concernant la méthode de capture (Tableau 3 et 4), c'est à chaque fois la pêche électrique qui est la méthode la plus efficace puisque cette dernière attrape 47% et 54% du total des poissons pour la première et deuxième semaine respectivement. Suivie par l'utilisation de piège à vairon avec une moyenne de 39.63 ± 2.51 %. Le piège à anguille quant à lui présente des résultats bien plus modeste probablement dû au plus faible nombre de pièges disposés dans les grottes par rapport aux pièges à vairons.

Tableau 3 : Récapitulatif du nombre de capture en fonction de la méthode pour la première semaine

Méthode de capture	Nombre de poissons	Pourcentage (%)
<i>Piège à anguille</i>	52	11.45
<i>Piège à vairon</i>	188	41.41
<i>Pêche électrique</i>	214	47.14
<i>Total</i>	454	100.00

Tableau 4 : Récapitulatif du nombre de capture en fonction de la méthode pour la deuxième semaine

Méthode de capture	Nombre de poissons	Pourcentage (%)
<i>Piège à anguille</i>	31	7.93
<i>Piège à vairon</i>	148	37.85
<i>Pêche électrique</i>	212	54.22
<i>Total</i>	391	100.00

3.2-Résultats des analyses statistiques

Aucun résultat statistique n'a encore été produit lors de la date du rendu de ce rapport. Ces derniers seront réalisés pendant les cinq semaines de stages qu'il me reste. Ces résultats feront l'objet d'un rapport pour le département d'aquaculture d'Hólar University College. Ce rendu présentera brièvement le protocole de collecte, les résultats statistiques détaillés obtenus ainsi qu'une discussion sur les résultats obtenus.

Conclusion

L'objectif de ce stage est d'une part de déterminer les variations moyennes sur la forme générale du corps de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) en fonction du temps, et d'autre part mettre en évidence les changements morphologiques dus aux conditions environnementales.

Cette étude fait suite à un projet de grande envergure réalisé par l'université de Hólar depuis 2012. Son but est d'étudier les rapports entre les variations phénotypiques dans l'espace et le temps des populations d'ombles chevaliers avec les facteurs écologiques. Ma contribution dans cette étude aura été dans la participation à l'ajout de données durant les deux campagnes de collectent du mois de Juin 2019.

Malheureusement l'interprétation des résultats et analyses statistiques n'a pu être réalisé au moment du rendu de ce rapport et aura lieu dans les semaines qui suivront. Aussi il n'est pas possible de conclure correctement sur les questions soulevées en introduction pour ce stage. Malgré tout à partir d'études réalisées par le passé (Birault, 2017), nous pouvons très fortement nous attendre à la présence d'une corrélation entre la forme des ombles chevaliers dans l'espace et le temps ainsi qu'en fonction des variables écologiques.

Ce stage aura été pour moi très instructif, déjà d'une part car il m'a permis de voir de nouveaux outils tels que RStudio qui est vraiment très complet ou encore différents logiciels de morphométrie. D'autre part il m'aura apporté énormément de nouvelles connaissances, sur le milieu de l'aquaculture qui était un domaine que je ne connaissais pas du tout, sur la manière dont s'organise et est dirigé des projets scientifiques. Et finalement bien entendu dans un contexte internationale ce stage aura été vraiment enrichissant en termes de connaissances linguistiques et culturelles.

Bibliographie

- Birault, M., 2017. Variation in space and time in body shape of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) found in lava caves near Lake Mývatn, Internship report, Génie de l'Aménagement et de l'Environnement, Ingénierie des Milieux Aquatiques, Polytech Tours, Hólar University College
- Berg, O.K. et Jonsson, 1989. Migratory pattern of anadromous Atlantic salmon, brown trout and arctic charr from the Vardnes river in northern Norway. In : Proceedings of the Salmonid Migration and Distribution Symposium, Trondheim, June 1987 (eds E.Brannon et B.Jonsson) : 106-115.
- Bookstein, F., 1991. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. Cambridge University Press, Cambridge (UK); New York
- Chevalier, G., 2016. The use of photographic identification to assess Arctic Charr populations sizes, Internship report, Génie de l'Aménagement et de l'Environnement, Ingénierie des Milieux Aquatiques, Polytech Tours, Hólar University College.
- Einarsson, A., 2004b. Lake Mývatn and the River Laxa: An introduction. Aquatic Ecology, 38: 111-114.
- Einarsson, A., Stefánsdóttir, G., Jóhannesson, H., Ólafsson, J. S., Már Gíslason, G., Wakana, I., Gudbergsson, G. and Gardarsson, A. 2004. The ecology of Lake Mývatn and the River Laxá: Variation in space and time. Aquatic Ecology 38: 317-348.
- Einarsson, A. 1982. The palaeolimnology of Lake Mývatn, northern Iceland: Plant and animal microfossils in the sediment. Freshwater Biology 12: 63–82.
- Gudmundsson Á. 1996. The sticklebacks of Mývatn. MSc. thesis, University of Iceland, Reykjavik. (In Icelandic, English summary).
- Hindar, K., N. Ryman et G. Stahl, 1986. Genetic differentiation among local populations and morphotypes of arctic charr, *Salvelinus alpinus*. Biol. J. Linn. Soc. 27: 269-285
- Johnson, L., 1980. The arctic charr, *Salvelinus alpinus*. In: Charrs, Salmonid Fishes of the Genus *Salvelinus*, pp. 15-98. W. Junk, The Hague.
- Jonsson, B., Skúlason, S., Snorrason, S., Lindem, T., 1988. Life History variation of Polymorphic Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in Thingvallavatn, Iceland. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 88-182
- Klemetsen, A., 2010. The charr problem revisited: exceptional phenotypic plasticity promotes ecological speciation in postglacial lakes. Freshwater Reviews 3: 49-74.
- Klemetsen, A., 2013. The most variable vertebrate on earth. Journal of Ichthyology, 53: 781-791.
- Kristjánsson, K B., 2005. Parallel evolution not always so parallel: comparaison of small benthic charr, *Salvelinus alpinus*, from Grimsnes and Thingvallavatn, Iceland. Environmental Biology of Fishes, 74: 239-244.
- Kristjánsson, B. K., Skúlason, S., Snorrason, S. S., & Noakes, D. L. G. (2012). Fine-scale parallel patterns in diversity of small benthic Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in relation to the ecology of lava/groundwater habitats. Ecology and Evolution, 2(6), 1099–1112. doi:10.1002/ece3.235

Kristjánsson, B. K., & Leblanc, C. A. (2018). Variation in the magnitude of morphological and dietary differences between individuals among populations of small benthic Arctic charr in relation to ecological factors. *Ecology and Evolution*, 8(3), 1573–1581. doi:10.1002/ece3.3761

Leblanc, C., 2016. Microevolutionary processes in small animal populations: cave dwelling Arctic char in Iceland. *The Icelandic Research Fund*, 8p.

Mitteroecker, P., Gunz, P., Windhager, S., Schaefer, K., 2013. A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics, with applications to facial morphology. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 24: 59-66.

Nordeng, H., 1983. Solution to the « char problem » based on arctic char (*Salvelinus alpinus*) in Norway. *Can J.Fish.Aquat.Sci.* 40: 1372-1387.

Ólafsson J. 1979a. Physical characteristics of Lake Mývatn and River Laxá. *Oikos* 32: 38–66.

ONSET Coporation. Technical Sheet : HOBO data loggers UA-002-64 [online]. Available on : <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ua-002-64> (visité le 14.06.2019)

Sæmundsson, K. 1991. Jarðfræði Kröflukerfisins. In: Gardarsson A. and Einarsson Á., Náttúra Mývatn. Hid íslenska Náttúrufræðifélag, Reykjavík, pp. 24–95.

Skúlason S., Noakes, D.L.G, Snorrasson S.S., 1989. Ontogeny of trophic morphology in four sympatric morphs of Arctic charr *Salvelinus alpinus* in Thingvallavatn, Iceland. *Biological Journal of the Linnean Society*, 38: 281-301.

Skúlason S., Antonsson T., Gudbergsson G., Malmaquist H., Snorrason S., 1991. Variability in Icelandic Artic charr, Iceland. *Buvisindi, ICEL. AGR. SCI.* 6, 1992 : 143-153

Snorrason, Sigurdur S., Skúli Skúlason. O.T. Sandlund, Hilmar J. Malmquist, B. Jonsson et Pétur M. Jonasson. 1989. Shape polymorphism in artic charr, *Salvelinus alpinus*, in Thingvallavatn, Iceland. *Physiol. Ecol. Japan Spec. Vol I*: 393-404.

The Society of Sensory Professional. Generalized Procrustes Analysis [online]. Available on : <http://www.sensorysociety.org/knowledge/sspwiki/Pages/Generalized%20Procrustes%20Analysis.aspx> (visité le 31.05.2019)

Thorarinsson, S. 1951. Laxárgljúfur and Laxárhraun. A tephrochronological study. *Geogr Ann Stockholm* H 1-2: 1–89.

Vrijenhoek, R.C., Guðrú Marteinsdóttir et R.Schenk, 1987. Genotypic and phenotypic aspects of niche diversification in fishes. In: *Community and Evolutionary Ecology of North American Stream Fishes* (eds W. Matthews et D.Heins). University of Oklahoma Press, Norman, U.S.A.:245-250



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Clément Gardien

2018-2019

Variations spatiotemporelles de la morphologie corporelle de multiples populations d'Omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) issues de grottes volcaniques

Résumé : Durant ce stage mon travail aura consisté d'une part à participer aux deux campagnes de collecte des données du mois de Juin. C'est-à-dire participer aux diverses méthodes de pêche des poissons, et de relever des valeurs des facteurs écologiques. Et d'autre part, réaliser des analyses statistiques afin d'observer la variation spatiotemporelle du phénotype des poissons, ainsi que le lien entre ces phénotypes et les variables écologiques.

Mots Clés : Omble chevalier, *Salvelinus alpinus*, Myvatn, grotte volcanique, morphologie, facteurs écologiques, Islande

Hólar University College : 551 Sauðárkrókur kt. 500169-4359

Tuteur entreprise : Bjarni Kristófer Kristjánsson, professeur et responsable du département d'aquaculture et biologie des poissons

Tuteur académique : Catherine Boisneau