

Production d'omble de fontaine adaptée aux changements climatiques: évaluation de l'importance des effets épigénétiques

STPGP/521227-2018 (CRSNG) / 550030 (OURANOS)

Par

Clare J. Venney, Céline Audet, Dany Garant, Louis Bernatchez

Décembre 2022

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Ce projet est financé par le gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.



Table des matières

1. Introduction	3
2. Contexte / objectifs	4
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature.....	5
4. Méthodologie / données.....	6
5. Résultats.....	8
6. Analyse et discussion	18
7. Conclusion et recommandations	19
8. Références	20

1. Introduction

L'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) est l'espèce la plus prisée pour la pêche récréative au Québec, activité qui génère des millions de dollars de revenus chaque année. Un grand effort d'ensemencement a ainsi lieu chaque année pour augmenter les stocks d'omble de fontaine. Cet effort d'ensemencement a un coût élevé pour le gouvernement et pour les organismes qui gèrent les pêches récréatives (pourvoiries, zones d'exploitation contrôlées et réserves fauniques). Cependant, l'omble de fontaine est considéré comme sensible aux changements climatiques actuels; une faible augmentation de quelques degrés de la température peut entraîner des conséquences négatives sur sa valeur sélective (c.a.d., fitness). Par conséquent, il est important de mieux comprendre la capacité de l'omble de fontaine à répondre aux changements thermiques en améliorant nos connaissances sur les mécanismes moléculaires sous-jacents, les implications phénotypiques et de façon plus globale sur la valeur sélective des animaux exposés à ces changements. En particulier, les mécanismes épigénétiques intergénérationnels peuvent permettre à la progéniture de répondre aux changements climatiques selon l'environnement des parents. Plus spécifiquement, les mécanismes épigénétiques peuvent être héréditaires, changer la transcription et le phénotype de la progéniture selon l'environnement des parents, et peuvent aussi modifier la valeur sélective de la progéniture. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés aux réponses phénotypiques, épigénétiques, et transcriptomiques face aux changements climatiques, spécifiquement ici face à une augmentation de la température, chez l'omble de fontaine. Ultiment, ces connaissances pourront permettre de développer et améliorer des modèles de schémas reproductifs et d'élevage des jeunes stades mieux adaptés aux conditions thermiques actuelles et futures pour la production d'omble de fontaine destinée à l'ensemencement.

2. Contexte / objectifs

Effets phénotypiques

1. Évaluer comment les conditions de températures auxquelles sont soumis les parents ? influencent les phénotypes (croissance et survie après ensemencement) de la progéniture.
2. Tester comment la sélection pour des traits d'intérêt peut affecter les effets parentaux lorsque présents. Dans le cas présent, sélection combinée pour l'absence de maturation sexuelle à 1+ – élimination de tous les individus ayant atteint le stade reproducteur à leur deuxième automne de vie – et croissance, le premier étant le trait phénotypique le plus négatif identifié par l'industrie.
3. Tester l'hypothèse voulant que l'effet du régime thermique au cours de la maturation sexuelle des adultes et de l'incubation de la progéniture puisse affecter positivement ou négativement la performance physiologique des poissons.

Effets épigénétiques

4. Déterminer les effets de la température pendant la maturation sexuelle sur la méthylation de l'ADN de la laitance des mâles, ce qui pourrait permettre l'héritabilité épigénétique intergénérationnelle.
5. Évaluer l'importance relative des températures au cours de la maturation sexuelle des parents et pendant l'élevage de la progéniture sur la méthylation de l'ADN de la progéniture.

Effets transcriptomiques

6. À l'aide d'un plan de croisement factoriel et du cadre conceptuel de la génétique quantitative, évaluer l'héritabilité et l'importance des interactions gènes-environnement et les effets de plasticité transgénérationnelle sur la variation de traits phénotypiques incluant la survie, la croissance, la résistance à des variations thermiques ainsi que l'expression de gènes impliqués dans les mécanismes épigénétiques et la réponse physiologique au stress thermique.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

L'omble de fontaine est l'espèce la plus importante pour la pêche récréative au Québec avec une valeur de 600 millions \$ selon le Ministère des Forêts, de la Faune, et des Parcs (MFFP). Pour maintenir les stocks d'omble de fontaine, desensemencements massifs ont lieu chaque année. Environ 720t sont ensemencées chaque année ce qui représente ~60% des ensemencements pour soutenir les pêches récréatives au Québec. De plus, ces ensemencements massifs supportent 3 000 emplois. L'omble de fontaine est très sensible aux impacts des changements climatiques. Une augmentation de la température peut réduire ou retarder le développement des gonades, la période de frai et la production reproductive. La survie des jeunes stades de vie peut également diminuer avec une augmentation de la température. Il faut développer une meilleure connaissance de la capacité de plasticité thermique chez l'omble de fontaine, ainsi que des effets sur les phénotypes et la valeur sélective associés à ces mécanismes. Ceci afin d'améliorer notre compréhension des mécanismes qui peuvent aider cette espèce à s'ajuster aux changements climatiques.

Les mécanismes épigénétiques comme la méthylation de l'ADN peuvent contribuer au potentiel de plasticité phénotypique face aux changements climatiques. La méthylation de l'ADN peut réguler l'expression des gènes selon l'environnement sans changements dans la séquence de l'ADN. La méthylation peut ainsi répondre rapidement aux changements climatiques sans nécessité de sélection ou de mortalité. De plus, la méthylation de l'ADN est souvent héritable, les expériences environnementales des parents peuvent donc changer l'expression des gènes et le phénotype de la progéniture même si cette progéniture n'a jamais été exposée à cet environnement. La méthylation est également affectée par le bagage génétique. Des différences entre des populations ou des lignées peuvent alors affecter leur capacité plastique, leur réponse phénotypique ou leur mode de réaction aux changements environnementaux. En somme, les mécanismes épigénétiques, incluant la méthylation de l'ADN, peuvent aider les poissons à répondre aux changements climatiques par l'expression modifiée des gènes. Ces changements épigénétiques peuvent être transmis à la progéniture et modifier leur phénotype en altérant la transcription des gènes.

Ces changements phénotypiques et épigénétiques face aux changements de température peuvent affecter la performance et la survie de la progéniture produite pour l'ensemencement. Comprendre comment la manipulation des conditions environnementales des parents lors de la maturation sexuelle ou de l'environnement du début de vie de la progéniture peut améliorer la réponse de l'omble de fontaine vis-à-vis de l'augmentation des températures des milieux naturels, peut permettre d'améliorer les efforts d'ensemencement au Québec. Dans le cadre de ce projet, nous avons cherché à comprendre l'effet des régimes de température auxquels étaient soumis les parents et leur progéniture sur les traits phénotypiques importants pour la conservation et l'ensemencement de l'omble de fontaine. Nous avons aussi déterminé comment le bagage génétique peut affecter la réponse à des températures plus élevées (e.g., entre des lignées ou des populations). Nous avons caractérisé les effets phénotypiques entre deux lignées qui sont souvent liés à la valeur sélective et qui ont des implications claires pour l'ensemencement et la conservation de l'omble de fontaine. Puis nous avons évalué les mécanismes moléculaires (transcription et méthylation de l'ADN) qui peuvent expliquer ces effets phénotypiques afin de vérifier leur source et leur variabilité.

4. Méthodologie / données

Pour ce projet, nous avons procédé à deux grandes expérimentations :

1. Nous avons comparé deux lignées, sélectionnée et contrôle (souche Laval), à la station aquicole ISMER/UQAR. La lignée sélectionnée a été élevée pour optimiser la croissance tout en minimisant la maturation sexuelle précoce tandis que la lignée contrôle est issue de croisements aléatoires. Les parents ont été divisés entre deux environnements thermiques ayant un écart de 2°C et ont été croisés en conditions de reproduction contrôlées. L'écart de 2°C a été choisi sur une base arbitraire en fonction de la revue de littérature effectuée au moment de soumettre le projet. De plus, un plus grand écart aurait présenté des risques trop élevés d'apparition de maladies opportunistes, les mâles étant particulièrement sensibles en période de reproduction. Les deux progénitures ainsi obtenues ont été maintenues dans les conditions d'élevages standardisées pour nos élevages à la station aquicole (baisse naturelle des températures d'eau douce en automne/hiver jusqu'à l'atteinte de 4°C, maintien à 4°C jusqu'au début de la résorption du sac vitellin, accroissement graduel pour atteindre 8°C au stade d'alimentation exogène).
2. Nous avons utilisé seulement la progéniture de la lignée contrôle maintenue à l'ISMER/UQAR pour une deuxième expérience menée au LARSA, à Université Laval. Pour chaque environnement (décrit ci-haut), les parents ont été croisés selon un design de reproduction contrôlé. Les œufs ont été envoyés à l'Université Laval dans les 24 heures et les œufs de chaque famille ont été subdivisés en deux pour exposition (incubation, élevage jusqu'à l'alimentation exogène) à deux environnements thermiques : 5°C et 8°C. Ces échantillons ont été utilisés seulement pour les objectifs 1, 2, 3 et 6.

Nous remercions Léopold Ghinter (challenges thermiques), Nathalie Morin (ISMER/UQAR) et toute l'équipe du LARSA (U. Laval) pour l'aide apportée durant les périodes d'incubation et de suivis des élevages tant à l'ISMER/UQAR qu'à l'Université Laval.

Effets phénotypiques

Pour répondre aux Objectifs 1, 2 et 3, la progéniture a été échantillonnée lors de trois périodes distinctes : 1) la première année en laboratoire, 2) la deuxième année en laboratoire et 3) la deuxième année après ensemencement en milieu naturel dans deux lacs de la Pourvoirie des bouleaux blancs à Forestville, QC. Dans ce dernier cas, seuls les alevins élevés à l'UQAR/ISMER ont été utilisés. Pour ces trois périodes, la masse, la taille corporelle et l'indice de Fulton ($K = 100 \times \text{masse}/\text{taille}^3$) de la progéniture ont été déterminés. La survie après l'ensemencement a aussi été évaluée en assignant les juvéniles capturés dans les deux lacs à leurs familles respectives (et à leurs traitements) grâce à des analyses génétiques en utilisant des microsatellites. La résistance au stress thermique a été mesurée chez les juvéniles conservés aux installations d'élevage en parallèle à ceux ensemencés et l'expression des gènes reliés à la réponse au stress, à la réponse au stress oxydatif et aux phénomènes de mort cellulaire ont été étudiés.

Une portion des alevins échantillonnés au stade de première alimentation a également été utilisée pour étudier l'expression d'un ensemble de gènes reliés à régulation de la croissance, à la réponse au stress et à la méthylation de l'ADN au niveau du cerveau et au niveau des principaux organes (cœur, foie, branchies, intestin). Dans ce dernier cas, les tissus ont été combinés pour l'extraction d'ARN.

Effets épigénétiques

Nous avons échantillonné la laitance des mâles et envoyé au séquençage de la méthylation du génome entier pour l'objectif 4. Nous avons identifié des régions d'ADN qui montrent un niveau de méthylation différent entre (1) les deux lignées, sélectionnée et contrôle, et (2) les deux environnements thermiques parentaux pendant la maturation sexuelle.

Nous avons fait le séquençage de la méthylation du génome entier de la progéniture d'expérimentation 2 pour déterminer les effets relatifs de la température parentale et de la température de la progéniture sur la méthylation.

Effets transcriptomiques

Pour l'étude des différentes réponses transcriptomiques, l'ARN a été extrait selon des méthodes standard et nous avons utilisé trois techniques principales pour comparer la réponse transcriptomique : l'étude du transcriptome (portion de l'étude sur les alevins en première alimentation), puces transcriptomiques mises au point par le consortium Gen-FISH (portion de l'étude sur les alevins en première alimentation) et la PCR quantitative (challenges thermiques). Pour les challenges thermiques, les analyses ont été effectuées sur le cœur et le foie.

5. Résultats

Tous les résultats sont tirés d'articles en préparation, soumis, en révision ou publiés – voir la liste dans la section 8 (Références). Les analyses sur le transcriptome et les résultats obtenus par utilisation des puces transcriptomiques (Gen-FISH) sont toujours en cours et la publication des résultats s'échelonne jusqu'à la fin de l'été 2023.

Effets phénotypiques

Assignations parentales

Nous avons assigné 177 des 184 (pourcentage d'assignation = 96%) poissons capturés un an après l'ensemencement en lacs à une famille donnée. Le nombre de poissons capturés par famille était très variable, allant de 0 à 23 (moyenne = 6,6), tout comme notre indicateur du pourcentage de survie par famille (plage de 0 à 13,8 %, moyenne = 4,7 %). À noter qu'un nombre similaire de poissons de chaque traitement avait été ensemencés et il n'y avait eu aucune pêche sur ces lacs depuis l'ensemencement. Le nombre de poissons provenant de chaque traitement de température des géniteurs était très différent, puisque nous avons capturé 166 poissons provenant du traitement de température chaude, alors que seulement 11 poissons provenant du traitement de température froide ont été échantillonnés. Les nombres de poissons capturés provenant des groupes sélectionnés et de contrôle étaient similaires (Traitement sélectionné, N = 83 ; Traitement non sélectionné, N = 94). Nous avons également observé une grande variation dans le nombre de poissons capturés par parent : certains individus n'ont eu aucune progéniture capturée, alors qu'un des mâles (M7UW) a engendré 55 des 184 individus capturés (tiré de Houle et al., *soumis*).

Effet du traitement de la température des géniteurs sur les traits morphologiques et la survie de la progéniture

Nous avons constaté que la progéniture issue d'adultes provenant du traitement à température froide avait un taux de survie en milieu naturel plus faible que celle provenant du traitement à température chaude (Fig. 1B, Tableau 1). La progéniture des parents exposés à la température froide avait un indice de condition de Fulton plus faible que celle des parents exposés à la température chaude lors de la deuxième année en laboratoire (Fig. 2C). De manière générale l'indice de condition de Fulton était lié à une survie plus élevée (Fig. 1A).

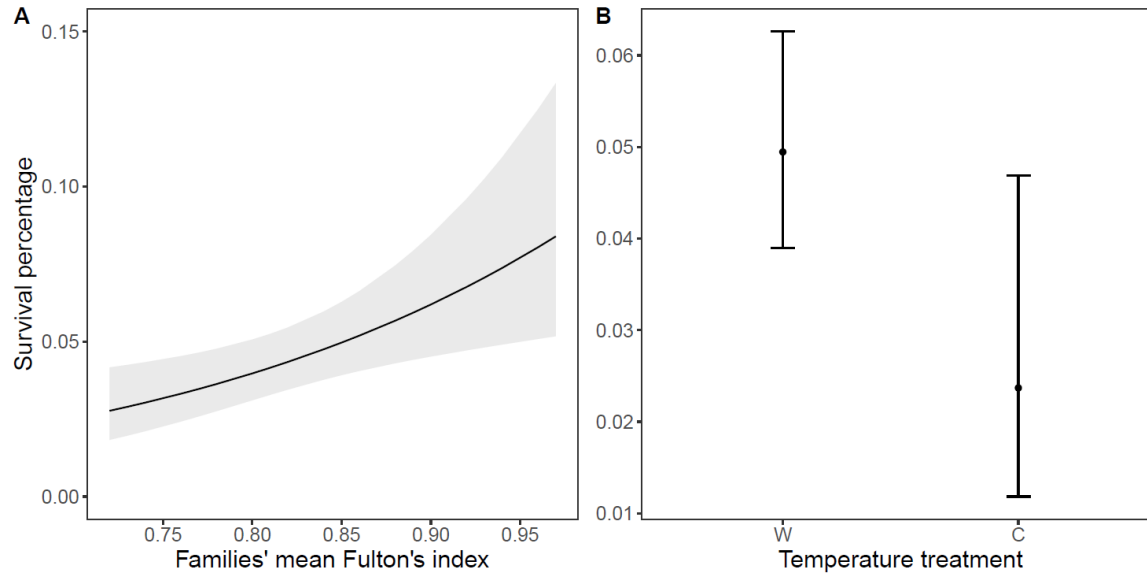


Figure 1. Pourcentage de survie de l'omble de fontaine la deuxième année dans les lacs naturels en fonction A) de l'indice de condition de Fulton moyen des familles à cette période, B) du traitement de la température (W=Chaud, C=Froid) en incluant la longueur du corps et l'indice de condition de Fulton comme traits morphologiques dans le modèle (tiré de Houle et al., *soumis*).

Tableau 1. Effets des traits morphologiques sur la survie de l'omble de fontaine dans les lacs naturels. Modèles mixtes linéaires généralisés finaux représentant l'effet des traitements et de la masse corporelle moyenne de la famille, de la longueur et de l'indice de Fulton dans un environnement naturel en septembre 2020, sur la survie de l'omble de fontaine un an après l'ensemencement (tiré de Houle et al., *soumis*).

	Estimation	SE	Valeur Z	Variance de l'effet aléatoire	Valeur P
Modèle incluant uniquement la masse corporelle (R marginal² = 0,031 ; R conditionnel² = 0,081)					
Intercepte	-2.949	0.150	-19.670		<0.001
Masse corporelle moyenne de la famille (g)	0.002	0.003	0.496		0.62
Température (C)	-0.884	0.428	2.065		0.041
Sélection (S)	-0.480	0.255	1.880		0.08
Température X Sélection	0.380	0.818	0.464		0.64
ID de la mère (aléatoire)				<0.001	1.00
ID du père (aléatoire)				0.180	0.001
Modèle incluant la longueur du corps et l'indice de Fulton (R marginal² = 0,058 ; R conditionnel² = 0,085)					
Intercepte	-6.806	1.384	4.918		<0.001
Indice de Fulton moyen de la famille	4.678	1.656	2.826		0.010
Longueur moyenne du corps de la famille (cm)	-0.003	0.039	0.087		0.93
Température (C)	-0.763	0.382	1.996		0.043
Sélection(S)	0.038	0.366	0.103		0.92
Température X Sélection	0.341	0.797	0.428		0.67
ID de la mère (aléatoire)				0.000	1.00
ID du père (aléatoire)				0.097	0.004

Note : Les identités des mères et des pères ont été incluses dans les deux modèles comme effets aléatoires. Les estimations en gras sont significatives.

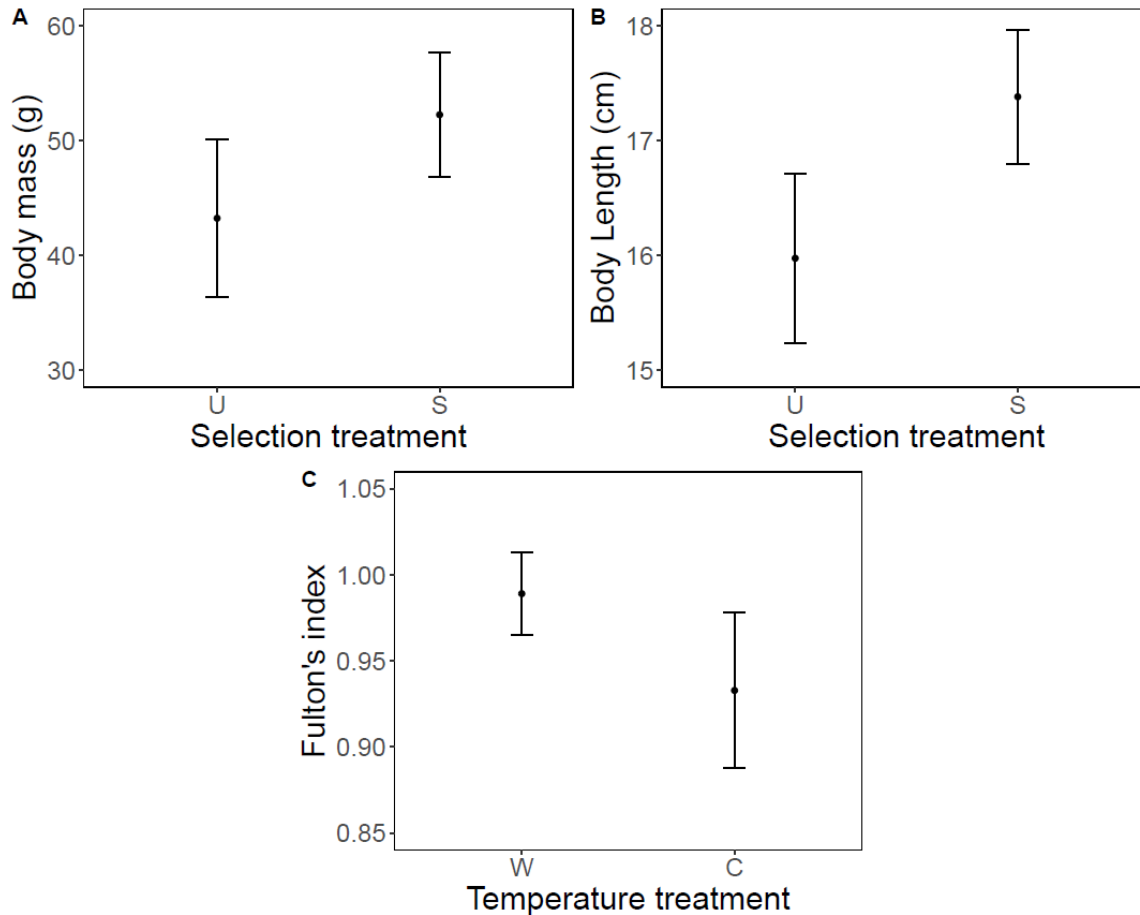


Figure 2. Effet A) du traitement de sélection (U=non sélectionné, S=sélectionné) sur la masse corporelle (g), B) du traitement de sélection sur la longueur corporelle (cm) et C) du traitement de la température (W=chaud, C=froid) sur l'indice de condition de Fulton de l'omble de fontaine la deuxième année dans un environnement de laboratoire (tiré de Houle et al., *soumis*).

Effet du traitement de sélection des géniteurs sur les traits morphologiques et la survie de la progéniture

Chez les poissons ayant passé un an dans des lacs naturels, nous avons trouvé un effet significatif du traitement de sélection sur l'indice de condition de Fulton. À cette période, les poissons provenant du groupe sélectionné avaient un indice de condition de Fulton plus faible que ceux du groupe non sélectionné (Fig. 3). Nous n'avons trouvé aucun effet du traitement de sélection sur la survie. Cependant, lors de la deuxième année en laboratoire, les poissons du groupe sélectionné étaient, en moyenne, 21% plus lourds et 9% plus longs que les poissons non sélectionnés (Fig. 2A, 2B; tiré de Houle et al., *soumis*).

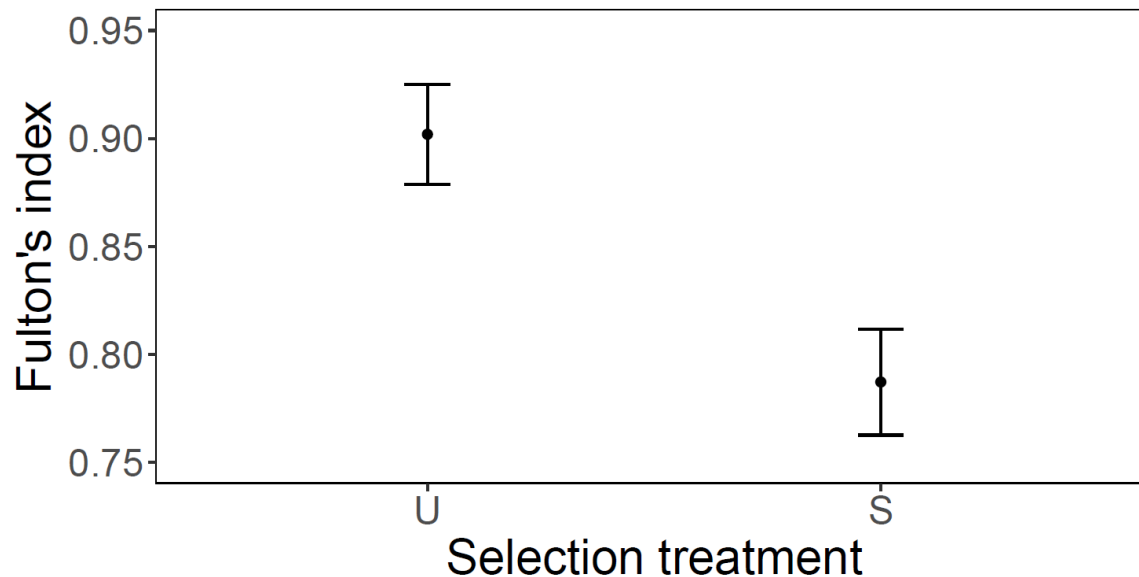


Figure 3. Effet du traitement de sélection (U=non sélectionné, S=sélectionné) sur l'indice de condition de Fulton des ombles de fontaine capturés la deuxième année dans des lacs naturels (tiré de Houle et al., *soumis*).

Effet de l'identité parentale sur les traits morphologiques et la survie de la progéniture

Nous avons constaté que la masse corporelle, la longueur et l'indice de Fulton étaient tous influencés par l'identité des deux parents la première et la deuxième année en laboratoire. La deuxième année dans les lacs naturels, seule l'identité de la mère influençait la masse corporelle et la longueur, mais pas l'indice de Fulton. À cette même période, c'est plutôt l'identité du père qui influençait la survie de la progéniture (tiré de Houle et al., *soumis*).

Effet des traits morphologiques de la progéniture sur la survie

Nous avons trouvé une relation entre l'indice de condition de Fulton, mais pas la masse corporelle ou la longueur, et la survie la deuxième année après l'ensemencement dans les lacs naturels (tiré de Houle et al., *soumis*).

Effet du traitement de sélection sur la résistance à un stress thermique

Les effets de la lignée (absence ou présence d'une sélection génétique) étaient présents pour la longueur standard aux deux stades de développement (Tableau 2). La puissance de la sélection combinée pour deux traits, taille et absence de maturité sexuelle précoce, a été confirmée dans cette étude qui a également montré que l'influence maternelle sur la variance phénotypique des traits étudiés était bien plus importante que l'influence paternelle (tiré de Rivolet 2021).

Tableau 2. Effet de la température en période de développement gonadique (TSM) et de la température d'incubation des œufs et d'élevage des alevins (TEF) sur différents phénotypes mesurés chez les alevins à l'éclosion et en début d'alimentation exogène (tiré de Rivolet 2021).

Developmental Stage	Variable	Retained model	Estimate	SE	P-value	Marg. r ²	Cond. r ²
Hatching	Survival (S)	S ~ TSM + (1 Dam) + (1 Sire)	1.57	0.50	0.002	0.10	0.29
	Development time (DD)	DD ~ TEF + (1 Dam)	26.42	6.14	p < 0.001	0.11	0.60
	Yolk sac volume (YSV)	YSV ~ TSM * TEF + (1 Dam) + (1 Sire)	9.75	1.42	p < 0.001	0.09	0.46
	Standard length (SL)	SL ~ TSM * TEF + (1 Dam) + (1 Sire)	0.72	0.08	p < 0.001	0.09	0.36
Yolk sac resorption	Survival	S ~ TSM + TEF + (1 Dam) + (1 Sire)				0.09	0.28
		TSM	1.42	0.48	0.003		
		TEF	0.09	0.02	p < 0.001		
	Development time	DD ~ TEF + (1 Dam)	152.44	4.92	p < 0.001	0.90	0.94
Standard length	SL ~ TSM * TEF + (1 Dam) + (1 Sire)	0.56	0.07	p < 0.001	0.05	0.51	

Pour l'expérience menée au LARSA, tant la température parentale que la température d'incubation/d'élevage ont eu des effets significatifs sur la croissance des alevins (Gourtay et al., *en préparation*). À l'éclosion, les alevins issus des parents en régime « chaud » et des œufs incubés à 5°C étaient les plus longs. À la résorption du sac vitellin, sans égard au groupe parental, les alevins élevés à 8°C étaient plus grands que ceux élevés à 5°C. Les effets maternels expliquent des portions similaires de la variance reliée aux effets parentaux aux deux stades de vie, mais l'héritabilité associée à la taille augmente de 0.25 à 0.53 de l'éclosion à la résorption du sac vitellin (Gourtay et al., *en préparation*).

Sur le plan physiologique, la sélection a un effet sur la résistance au stress thermique. Les alevins issus de la lignée sous sélection ont montré la plus grande résistance avec une température à laquelle on observe une perte d'équilibre environ 1°C plus élevée que celle observée pour ceux de la lignée contrôle (Fig. 4). L'observation de la perte d'équilibre (le poisson tourne sur le côté ou sur le ventre) est un proxy utilisé pour éviter de faire des tests de LD₅₀ qui entraînent la mort et qui ne sont plus jugés acceptables en recherche biologique. Dès qu'un poisson perd l'équilibre, il est retiré des conditions expérimentales stressantes et immédiatement placé dans un bassin de récupération assurant ainsi sa survie. L'étude transcriptomique indique que cette résistance accrue serait associée à une forte expression de différents gènes impliqués dans la réponse au stress (protéines de choc thermique) et à la réponse au stress oxydatif (Gourtay et al., *en préparation*).

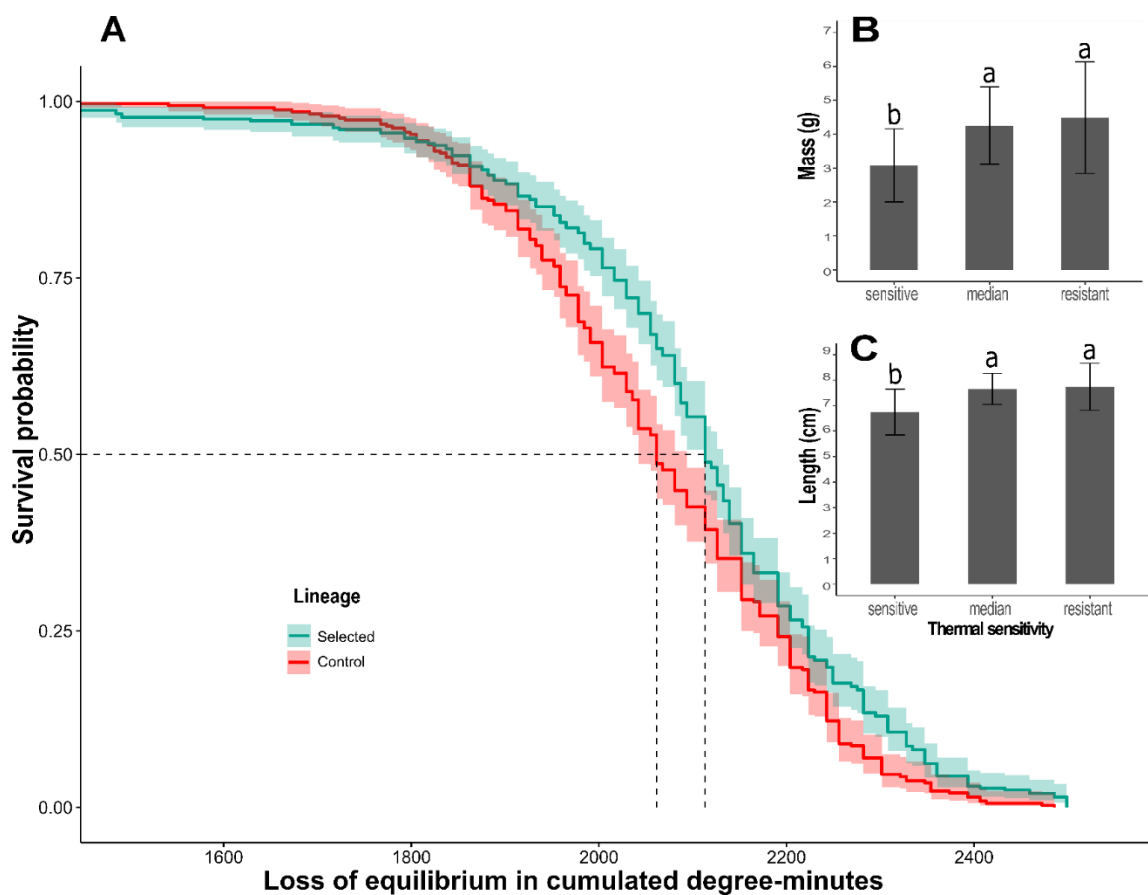


Figure 4. Effet de la sélection sur la tolérance thermique et relations entre la masse et la taille des alevins et la sensibilité au stress thermique (tiré de Gourtay et al., *en préparation*).

L'expérience menée au LARSA a quant à elle montré une absence d'effets de la température subie par les parents en période de maturation gonadique sur la résistance au stress thermique. Par contre, de façon surprenante, ce sont les alevins produits à 5°C qui montrent la plus grande résistance (Gourtay et al., *en préparation*). Dans ce cas, la plus grande résistance est aussi associée à des éléments de réponse au stress, mais également à des gènes de régulation du métabolisme. Les résultats sont toutefois encore en analyse.

Effets épigénétiques

Nous avons trouvé 393 régions différentiellement méthylées (RDMs) entre la laitance des mâles sélectionnés et contrôles et 119 RDMs selon la température de maturation sexuelle (Fig. 5), ce qui montre qu'il y a de grandes différences épigénétiques entre les deux lignées. En considérant les lignées séparément, nous avons trouvé 85 RDMs entre les températures pour la lignée contrôle et 302 RDMs pour la lignée sélectionnée. Cela indique que les lignées répondent différemment aux régimes thermiques et que ces effets pourraient être héréditaires (tiré de Wellband et al., *en révision*).

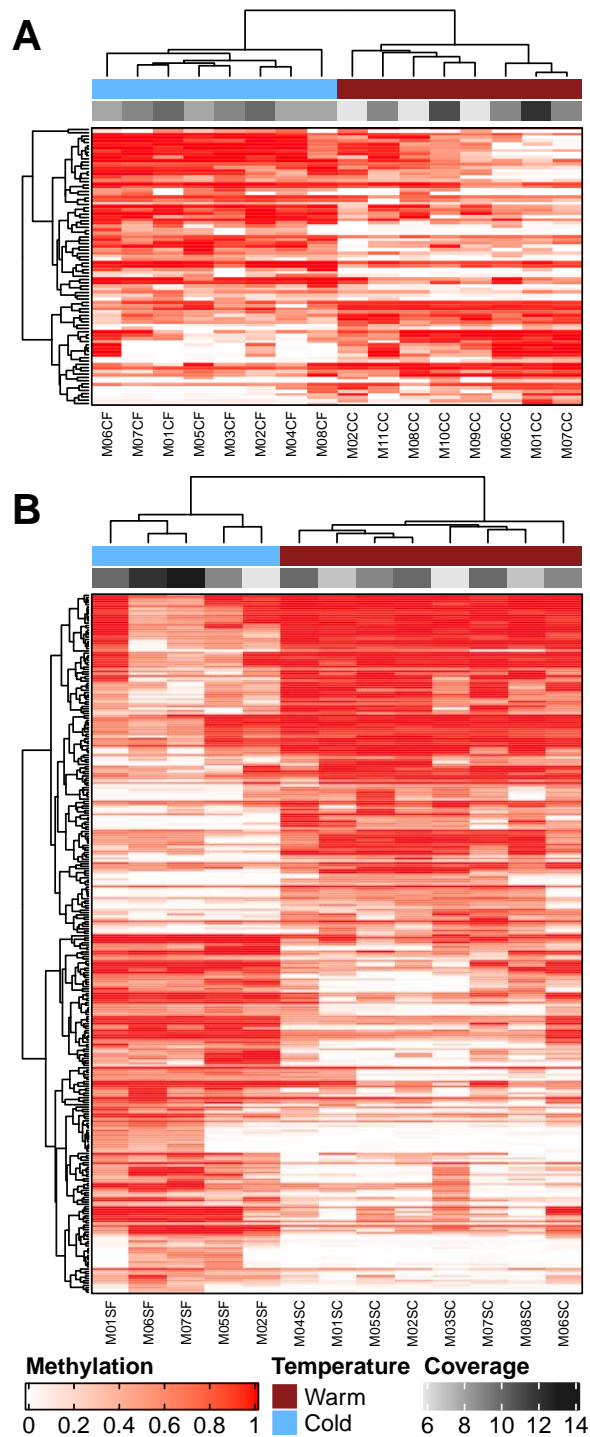


Figure 5. Effet de la température pendant la maturation sexuelle dans la laitance des poissons contrôles (A, 57 RDMs) et sélectionnés (B, 165 RDMs). Les valeurs pour chaque cellule représentent le taux de méthylation moyen pour tous les sites CpG dans chaque région (tiré de Wellband et al., *en révision*).

Chez la progéniture, nous avons trouvé que la température de l'environnement des parents pendant la maturation sexuelle est plus importante que la température d'élevage de la progéniture. Nous avons identifié 188 RDMs dépendant de la température de l'environnement des parents (Fig. 6) et seulement 34 RDMs liées à la température environnementale de la progéniture (tiré de Venney et al., 2022).

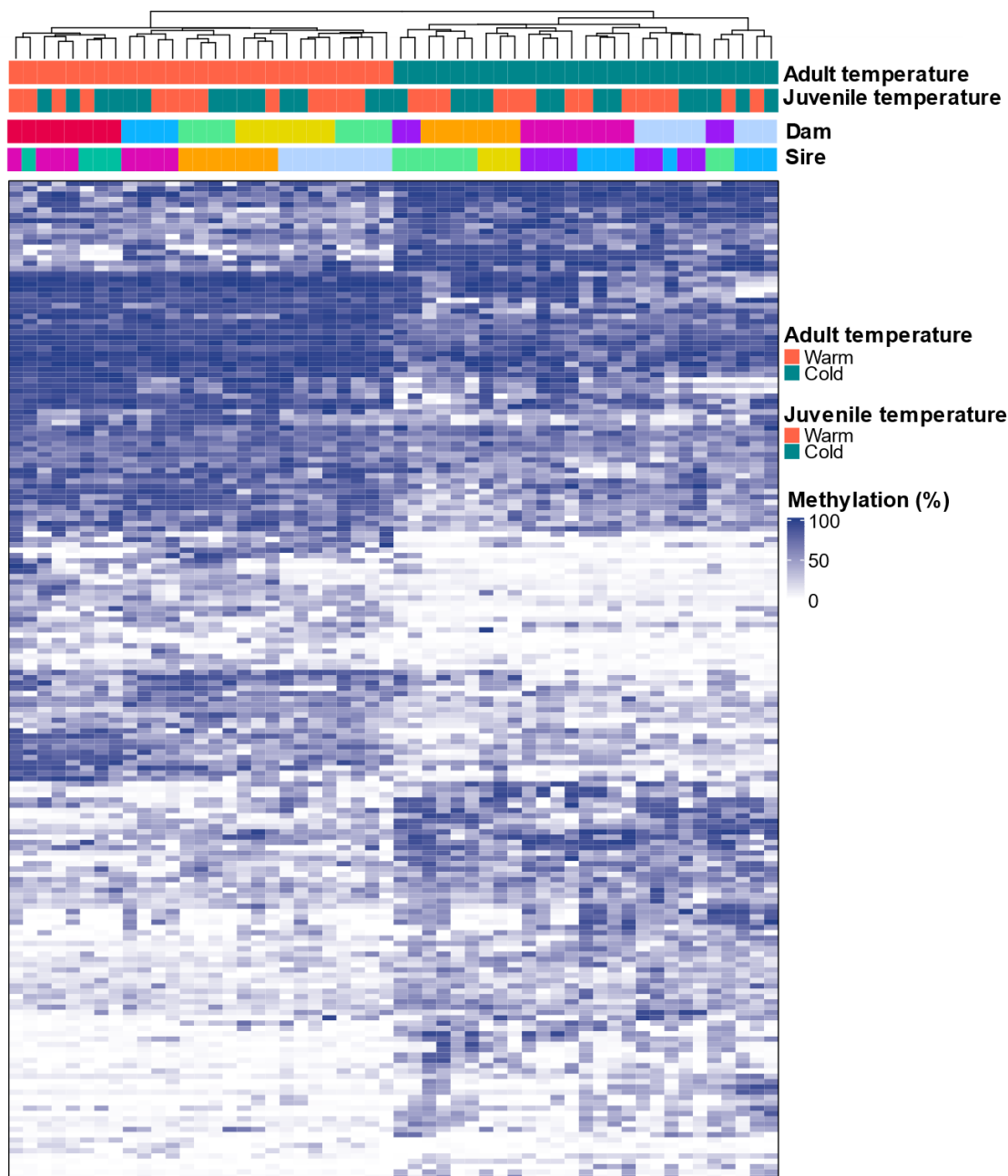


Figure 6. Effet de la température au cours de la maturation sexuelle des parents sur la méthylation de l'ADN du foie de la progéniture. Nous avons trouvé 188 RDMs selon la température du milieu des parents, avec des preuves de clustering basées sur la famille. Les valeurs de chacune des cellules

représentent le taux de méthylation moyenne pour tous les sites CpG de chaque région (tiré de Venney et al., 2022).

Effets transcriptomiques

L'étude du transcriptome n'est réalisée que chez les alevins issus de l'expérience menée au LARSA et au stade de résorption du sac vitellin. Les analyses sont actuellement en cours, mais les résultats préliminaires obtenus au niveau du cerveau indiquent très clairement des effets épigénétiques importants avec près de 100 fois plus de gènes sur ou sous-exprimés entre alevins élevés à une même température, mais issus de parents exposés à des températures différentes en période de maturation des gonades, qu'entre alevins élevés à des températures similaires et issus d'un même groupe parental (Fig. 7). L'ensemble des résultats associés à cette portion du travail devrait être prêt pour publication d'ici la fin de l'été 2023.

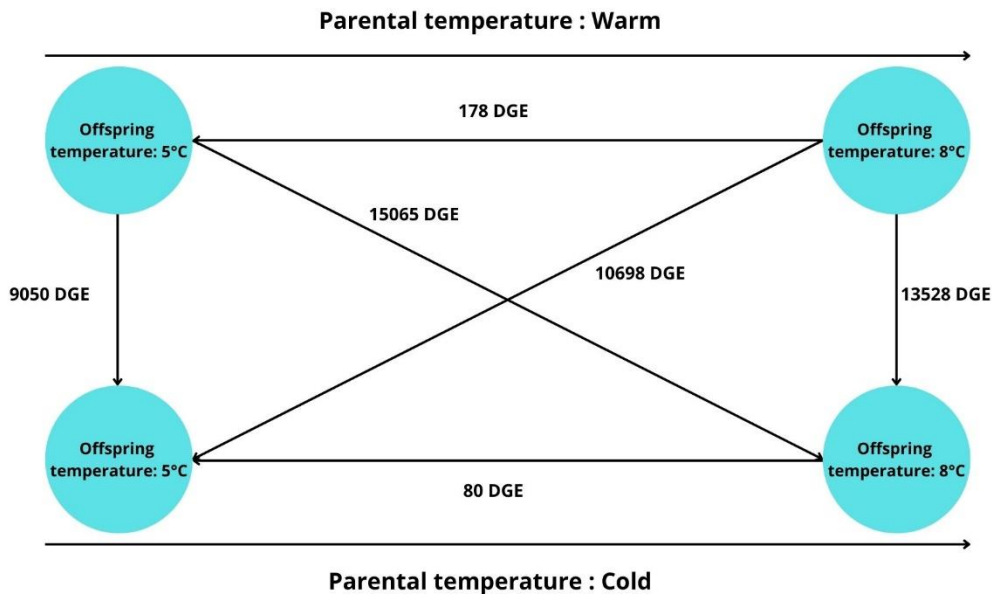


Figure 7. Nombre de gènes exprimés différemment dans le cerveau des alevins en fonction de la température durant le développement gamétique et de la température d'incubation et d'élevage des alevins (tiré de Banousse et al., *en préparation*).

6. Analyse et discussion

Effets phénotypiques

Nous avons montré que les effets parentaux transgénérationnels peuvent parfois être détectés seulement à **des stades de vie spécifiques** et dans **certaines conditions environnementales**, ce qui **souligne l'importance d'échantillonner les populations dans différentes conditions et à différentes périodes**. Dans notre étude, la température expérimentée par les adultes a affecté la survie de la progéniture, ce qui suggère soit un effet adaptatif des poissons acclimatés au chaud, soit, moins probablement, des effets parentaux transgénérationnels maladaptatifs des poissons acclimatés au froid.

Nous avons également constaté que le traitement de sélection, qui visait à améliorer la croissance des poissons, avait peu d'impact sur les effets parentaux liés à la température et entraînait des effets incohérents sur les traits morphologiques, selon la période d'échantillonnage et l'environnement. La sélection artificielle devrait donc être étudiée de manière plus approfondie, afin de mieux comprendre ses conséquences générales sur les poissons, ainsi que son impact sur le succès d'ensemencement. Enfin, notre étude confirme également que les effets paternels, qui sont encore peu étudiés, peuvent parfois avoir une influence plus importante sur les traits que les effets maternels.

Effets épigénétiques

Nous avons montré que la température lors de la maturation sexuelle des parents peut influencer la méthylation de la laitance des mâles, et ainsi induire de l'héritabilité épigénétique. Les différences entre les deux lignées, sélectionnée et contrôle, suggèrent que le régime de sélection a des effets sur des marques épigénétiques. Aucune des RDMs entre les deux températures des milieux parentaux ont été partagées entre ces deux lignées. Ceci indique que les réponses épigénétiques plastiques entre les lignées sont divergentes et les réponses impliquent des gènes différents. La méthylation de l'ADN peut modifier l'expression des gènes ainsi que le phénotype. L'héritabilité épigénétique peut donc modifier la méthylation de la progéniture et préparer les rejetons à des conditions environnementales similaires à celles de leurs parents.

Nous avons également montré que la température du milieu parental pendant la maturation sexuelle a un effet disproportionné sur la méthylation de la progéniture. En effet, même lorsque le régime thermique de la progéniture ne correspond pas à celui de ses parents, l'environnement des parents est celui qui affecte le plus la méthylation des rejetons. Ce résultat peut améliorer la performance de la progéniture si l'environnement thermique parental permet de prédire le régime thermique de la progéniture. La progéniture n'aurait donc pas besoin de répondre à son propre environnement si elle est née préparée à un environnement thermique spécifique. En revanche, si les régimes thermiques des parents et de la progéniture ne correspondent pas, l'héritabilité épigénétique pourrait s'avérer maladaptative pour la progéniture.

Il nous faut souligner que l'ensemble des travaux issus ce projet ne sont pas encore complétés. Certains manuscrits sont encore à l'étape de la rédaction et donc les interprétations ne sont pas finalisées. Dans

d'autre cas, les analyses en laboratoire ne sont pas terminées et les conclusions ne seront disponibles que dans quelques mois.

7. Conclusion et recommandations

Bien que d'autres études soient nécessaires pour comprendre toute la portée de nos résultats, les réponses au traitement de température que nous avons rapportées ici suggèrent que les effets parentaux transgénérationnels pourraient permettre à l'omble de fontaine de s'ajuster, dans une certaine mesure, aux changements anticipés des températures environnementales.

Ce résultat et ses implications sont particulièrement intéressants dans le contexte actuel du réchauffement climatique et soulignent l'importance de mener des études similaires pour comprendre l'impact du changement climatique sur les espèces aquatiques.

8. Références

Banousse G, Semeniuk C, Bernatchez L, Audet C. (*En préparation*) Brain transcriptome and epigenetics response in brook charr *Salvelinus fontinalis*.

Houle C, Gossieaux P, Bernatchez L, Audet C, Garant D. (*Soumis*) Transgenerational parental and environmental effects on body size and survival in brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Evolutionary Applications*.

Gourtay C, Rivolet M, Ghinter L, Bernatchez L, Garant D, Audet C. (*En préparation*). Selection process and parental effects on early life history traits and thermal resistance of offspring in brook charr *Salvelinus fontinalis*.

Gourtay C, Rivolet M, Ghinter L, Bernatchez L, Garant D, Audet C (*En préparation*). Transgenerational parental effects on thermal resistance in brook charr fry.

Rivolet M. (2021) Effet de la sélection et du régime thermique subi par les géniteurs lors de la maturation sexuelle sur la croissance et la survie à l'éclosion et résorption du sac vitellin des alevins d'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). Contribution parentale dans la variance phénotypique. *Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski*. Direction de thèse, C. Audet; codirection: Dany Garant, Université de Sherbrooke. <https://semaphore.uqar.ca/id/eprint/2017/>

Venney CJ, Wellband KW, Normandeau E, Houle C, Garant D, Audet C, Bernatchez L. (2022) Thermal regime during parental sexual maturation, but not during offspring rearing, modulates DNA methylation in brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 289(1974): 20220670.

Wellband KW, Normandeau E, Audet C, Garant D, Bernatchez L. (*En révision*) Selection for performance traits influences DNA methylation and alters epigenetic responses to simulated climate-warming in experimental brook charr (*Salvelinus fontinalis*) lines. *Evolutionary Applications*.