

Année universitaire : 2024 - 2025

Spécialité : Ingénieur agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sciences halieutiques et aquacoles,
préparée à L'Institut Agro Rennes-Angers
(option Aquaculture)

Mémoire de fin d'études

☐ d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

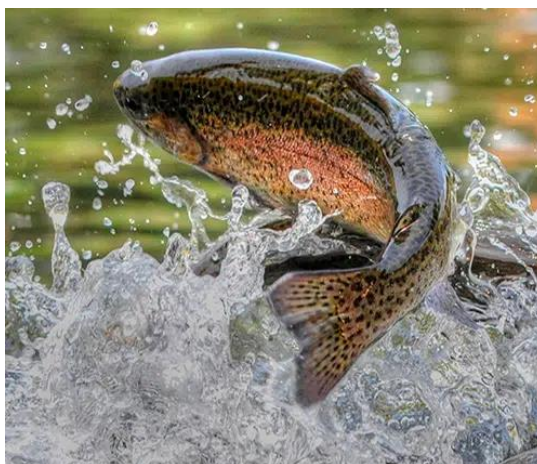
☒ d'ingénieur de l'Institut Agro Dijon (étudiant arrivé en M1)

☐ de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Analyse des déterminants phénotypiques et génétiques de la résilience de la truite arc-en-ciel face au stress thermique chronique estival en pisciculture

Par : Corentin ERMACORA



Soutenu à Rennes le 10/09/2025

Devant le jury composé de :

Président : Bastien Sadoul

Maître de stage : Mathieu Besson

Enseignant référent : Bastien Sadoul

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Hervé Le Bris (Enseignant-chercheur L'institut Agro Rennes-Angers)

Simon Pouil (Chercheur-INRAE)

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation «Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France» disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>

I - Introduction

L'élevage de la truite Arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) occupe une place très importante dans la production piscicole française avec une production de 33 082 tonnes en 2022, ce qui représente 80% de la production piscicole et 18% de la production aquacole de l'hexagone (FAO fishstat et Franceagrimer 2023). Le marché de la truite fumée connaît un fort développement depuis quelques années. La consommation était de 6 785 T en 2023 (5 469 T en 2018) mais on estime à 1000 T le manque d'offres faute de produits mis à disposition. Le gouvernement français souhaite donc dynamiser la filière. Il a notamment lancé le Plan d'Aquaculture d'Avenir qui donne pour objectif la production de 12 000 tonnes de truite fumée en 2030. (Franceagrimer 2018, Franceagrimer 2023 et Plan d'Aquaculture d'Avenir).

Cet objectif ambitieux doit et devra s'accomplir dans le contexte actuel de réchauffement global qui impacte l'aquaculture de manière non négligeable (FAO 2024).

En effet, la température de l'eau est un paramètre crucial en pisciculture de truite, car c'est un poisson ectotherme. Ainsi, sa vitesse de croissance dépend de la température de l'eau. L'optimum thermique de la truite arc-en-ciel (TAC) se situe entre 13 et 17°C, les juvéniles ayant un optimum thermique plus élevé que les adultes (Bear 2006; Hokanson 1977). En dehors de cette plage, les poissons subissent un stress thermique. Plus l'écart avec l'optimum est important, plus le stress s'intensifie et les performances zootechniques se dégradent jusqu'à provoquer la mort des poissons (<0°C et >20-30°C (FAO., 2009 ; Crichigno et Cussac., 2019 ; Rodnick *et al.*, 2004 ; Molony *et al.*, 2004 ; Bear *et al.*, 2007)).

Le réchauffement climatique est une réalité à laquelle les piscicultures françaises doivent faire face. La Figure 1 illustre, à titre d'exemple, l'augmentation de la température de l'eau au cours d'une année dans la pisciculture de Pissos, en comparant les périodes 2004-2010 et 2015-2024.

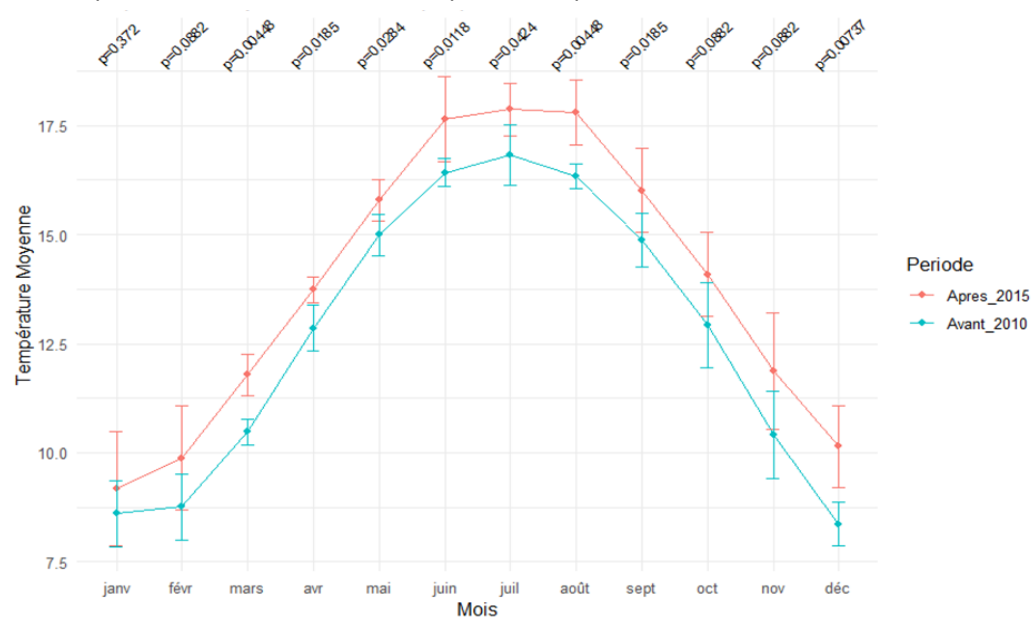


Figure 1 : Comparaison des températures mensuelles moyennes sur les périodes 2004-2010 et 2015-2024 (2018-2022 exclu par manque de données). Les p value fournies proviennent de tests de Kruskal-Wallis.

Ces températures élevées ne sont pas sans conséquences. Les résultats obtenus par Jiang *et al* (2021) montrent notamment qu'une température de l'eau élevée (21°C pendant 28 jours) provoque chez la TAC une baisse de la croissance (taux de croissance spécifique de 1,46% à 17°C et 0,95% à 21°C), une baisse significative de l'activité de la pepsine, de l'amylase et de la lipase (de 17 à 21°C) et donc une diminution de la digestibilité des protéines, glucides et lipides, une inhibition de l'appétit (prise alimentaire de 62,43g/ind à 17°C et de 49,65g/ind à 21°C) et une augmentation de l'indice de consommation (1,13 à 17°C et 1,49 à 21°C).

Il est donc nécessaire que la filière truiticole française s'adapte à ces bouleversements afin qu'elle puisse continuer son développement, de la manière la plus durable possible. Plusieurs possibilités d'adaptation au changement climatique s'offrent aux éleveurs. Cette adaptation peut notamment passer par la nutrition, la zootechnie ou la sélection génétique (Reid *et al.*, 2019). La sélection génétique est une solution intéressante, car elle permet de générer un gain permanent et cumulatif de génération en génération, à condition que le caractère soit héritable.

La tolérance à l'hyperthermie a, jusqu'à maintenant, été mesurée via des caractères relativement figés dans le temps, souvent évalués par des critères binaires (survie/mort) ou des performances ponctuelles (gain de poids sur une période d'hyperthermie). Ce type d'évaluation ne permet pas de saisir la dynamique de réponse des individus notamment dans des contextes thermiques hautement fluctuants, comme c'est souvent le cas en élevage truiticole où les températures peuvent varier fortement de jour en jour et au cours des saisons. Ainsi, au-delà de critères de tolérance ponctuels classiquement utilisés, la notion de résilience, récemment mise en avant dans la littérature, offre un cadre d'analyse plus intégré, permettant de prendre en compte la réponse à long terme des poissons face aux stress thermiques.

La résilience peut être définie comme la capacité d'un animal à être minimalement affecté par des perturbations et/ou à retrouver rapidement l'état qu'il avait avant la perturbation (Colditz and Hine, 2016). En élevage, la résilience peut aussi être définie comme le maintien des performances de production dans le temps, notamment la régularité de la croissance dans des conditions stressantes (Aththar *et al.*, 2024 ; Mengistu *et al.*, 2023). Plusieurs caractères de résilience ont été étudiés (variance des déviations, autocorrélation des déviations, asymétrie des déviations, voir Berghof *et al* (2019b)). Le logarithme népérien de la variance des déviations (lnVar) est un caractère de résilience de plus en plus étudié. Il reflète la constance de la croissance : plus celle-ci est fluctuante, plus les écarts à la moyenne de poids de la population seront fluctuants et donc plus le lnVar sera élevé. La capacité à maintenir une croissance constante malgré les fluctuations environnementales représente un atout majeur dans un contexte de réchauffement climatique, et le lnVar est un indicateur de cette aptitude.

Au niveau national, aucune étude ne s'est penchée sur les bases génétiques de la tolérance et de la résilience face à l'hyperthermie chronique des truites issues de cheptels de sélectionneurs français. Le projet HyperSelect s'inscrit dans cette démarche avec une mission d'évaluation des performances zootechniques des TAC face à des conditions hyperthermiques chroniques dans deux piscicultures du groupe Aqualande. Les deux piscicultures choisies diffèrent drastiquement par leurs conditions thermiques. La pisciculture de Brusque sur source possède un profil thermique très stable (14°C toute l'année) alors que la pisciculture de Pissos possède un profil thermique très fluctuant avec de longues périodes chaudes (26 jours au-dessus de 20°C en 2023).

Nous avons aussi comparé diploïdes et triploïdes, car une grande partie du cheptel français est constituée d'individus triploïdes. Il est donc intéressant d'étudier à la fois la résilience des individus diploïdes et triploïdes face au stress thermique chronique.

Au sein de ce projet, les objectifs des travaux présentés dans ce mémoire sont donc :

- 1) De comparer les performances zootechniques entre les sites (Brusque et Pissos) sur des animaux issus d'une même cohorte de truites diploïdes dérivées du noyau de sélection génétique d'Aqualande
- 2) De comparer les performances zootechniques entre diploïdes et triploïdes sur le site de Pissos.
- 3) De comprendre quels facteurs biotiques et abiotiques impactent la croissance et la survie.
- 4) D'estimer les paramètres génétiques des différents caractères de croissance, survie, rendement, tolérance et résilience dans les 2 sites et calculer les corrélations génétiques entre piscicultures de ces différents caractères.

II – Matériels et Méthodes

A - Description de l'expérimentation

1 - Origine des poissons

À partir du noyau de sélection de truite du groupe Aqualande, 10 croisements factoriels, chacun impliquant environ 10 néomâles et 10 femelles, ont été réalisés à la pisciculture de Sorgues (car elle dispose d'une machine hyperbare) à partir des semences collectées sur la pisciculture de Brusque (création d'environ 1000 familles). À partir de cette cohorte nouvellement née, quatre lots ont été créés puis élevés dans deux piscicultures distinctes : le lot des candidats à Brusque, un lot diploïde à Brusque, un lot diploïde à Pissos et un lot triploïde à Pissos.

2 - Données collectées :

a – Croissance et mortalité

i - Brusque

Les truites du lot S2B ont été élevées ensemble sur l'intégralité de la période d'élevage. La fin des éclosions a été observée le 02/01/2024. Les rations journalières distribuées sont documentées sur l'ensemble de la période d'élevage, depuis le premier nourrissage. Le nombre de morts par jours est aussi disponible. Les truites de ce lot ont été marquées avec un PIT-tag le 27 juin, date à laquelle les animaux ont également été pesés et mesurés.

ii – Pissos

Les lots S2P et S3P ont été élevés séparément pendant l'entièreté du cycle d'élevage. La fin des éclosions a été observée le 31/12/2023. Les rations journalières distribuées sont disponibles à partir du marquage. Le nourrissage a été réalisé à satiété. Le suivi quotidien des mortalités est également disponible.

Le résumé des biométries réalisés sur les deux piscicultures sont disponibles dans la figure 2.

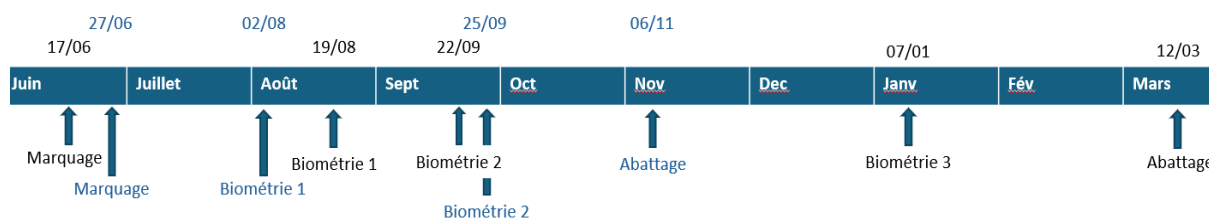


Figure 2 : Timeline des biométries réalisées sur les piscicultures de Brusque (en bleu) et Pissos (en noir).

b – Données environnementales

À la pisciculture de Pissos, la température de l'eau est mesurée toutes les 10 minutes au milieu de la série de bassins. À partir de ces données, 4 indicateurs journaliers ont été calculés : la température moyenne journalière, la température maximale journalière, la température minimale journalière et l'amplitude thermique journalière. À Brusque, seule la température moyenne journalière est disponible.

À Pissos, la concentration en O₂ dissous et le pH de l'eau ont été enregistrés toutes les 10 minutes dans chaque bassin.

B - Analyses des données phénotypiques

1 - Données calculées :

À partir des données longitudinales de poids le caractère de résilience Invar_cohorte a été calculé.

La méthode de calcul du Invar_cohorte utilisée provient de Berghof et al (2019) et Mengistu et al (2022).

2 - Analyses statistiques des phénotypes

Plusieurs tests statistiques et modèles ont été utilisés pour analyser les données de mortalité, de croissance, de rendements et de résilience.

a - Mortalité

i - Effets abiotiques

L'analyse des données de mortalité s'est faite dans un premier temps en écartant toutes les mortalités liées aux biométries (48h suite à une biométrie). Les taux de mortalité cumulés ont été calculés pour chaque site et chaque ploidie. L'analyse de la température sur la période d'élevage a été réalisée en parallèle.

Les données de mortalité depuis le marquage ont été découpées en périodes glissantes de 3 jours. Sur ces 3 jours, le taux de mortalité, la température moyenne, l'amplitude thermique journalière moyenne, la concentration en O₂ moyenne ainsi que le pH moyen ont été calculés. Dans l'objectif de déterminer si la température, l'amplitude thermique, le pH et la concentration en O₂ impactent la mortalité, plusieurs modèles linéaires mixtes généralisés (GLMM) ainsi que des modèles additifs mixtes généralisés (GAMM) ont été testés. Le modèle GAMM a l'avantage de permettre de modéliser une relation non linéaire entre variables abiotiques et mortalité. Les modèles GLMM ont été sélectionnés sur le critère AIC. Le modèle GAMM présenté est celui avec les mêmes effets que le meilleur GLMM.

ii - Effets biotiques

Plusieurs modèles de Cox ont été utilisés sur les données de mortalité pour estimer l'effet du poids et de la ploïdie sur la survie. L'intérêt du modèle de Cox dans ce contexte est qu'il se base sur des données individuelles (auxquelles on a accès grâce aux biométries) et qu'il est spécialement fait pour modéliser la survie. Il est souvent utilisé dans le domaine médical (Nikulin et Wu, 2016). Il estime la fonction de risque instantané de mort à l'instant t pour un individu i avec la variable X (poids ou ploïdie).

C - Analyses génétiques :

1 - Estimations des paramètres génétiques

Les héritabilités et corrélations génétiques entre caractères au sein du même site et entre sites ont été estimées avec des modèles linéaires mixtes univariés (pour l'estimation de l'héritabilité) et bivariés par paire de caractères (pour l'estimation des corrélations génétiques). Les modèles sont de la forme suivante :

$$y_{ij} = \mu + \beta_0 \times \text{poids au marquage}_i + \text{bassin}_j + a_i + \varepsilon_{ij}$$

Avec y_{ij} la valeur du caractère y de l'individu i du bassin j , μ la moyenne de la population, $\beta_0 \times \text{poids au marquage}_i$ l'effet fixe quantitatif (covariable) du poids, uniquement pris en compte pour le gain de poids estival corrigé, bassin_j l'effet fixe du bassin j , a_i l'effet animal aléatoire de l'individu i , estimé avec un pedigree remontant sur 13 générations et ε_{ij} l'effet résiduel de l'individu i du bassin j .

Il a été choisi d'étudier le gain de poids estival corrigé comme un caractère de tolérance. Les températures sont maximales entre le marquage (22 juin) et la première biométrie (18 août). Le poids à la biométrie 1 corrigé par le poids au marquage (en covariable) permet donc d'obtenir un caractère de croissance estivale corrigée correspondant au gain de poids réalisé n'étant pas expliqué par le poids au marquage. On suppose que les poissons les moins sensibles au stress hyperthermique subit entre le marquage et la première biométrie sont ceux qui ont continué à bien s'alimenter et qui donc ont une meilleure croissance.

2 - Estimations du progrès génétique

En utilisant les paramètres génétiques estimés précédemment, nous avons évalué le progrès génétique attendu par génération pour le gain estival corrigé (caractère de tolérance) et le poids à l'abattage (caractère de production) en pisciculture de production (Pissos), représentant les deux caractères d'intérêt pour la filière, en testant deux méthodes de sélection.

Nous avons calculé le progrès génétique (en %) pour le poids à l'abattage à Pissos et le gain de poids estival corrigé à Pissos pour quatre scénarii :

- Sélection massale (2% de pression de sélection) du poids à taille commerciale à Brusque
- Sélection massale (2% de pression de sélection) du gain estival corrigé à Brusque
- Sélection généalogique (10% de pression de sélection) sur les poids à l'abattage à Pissos
- Sélection généalogique (10% de pression de sélection) sur le gain estival corrigé à Pissos

III - Résultats et Discussion

A – Description des paramètres abiotiques

Les paramètres abiotiques à Pissos sont très fluctuants. On peut se demander s'ils ont un impact sur la mortalité.

B - Partie phénotypique

1 - Analyse de la mortalité

a - Effets des paramètres abiotiques.

Pour le pH et l'amplitude thermique, les résultats des modèles GLMM et GAMM sont similaires, le modèle GAMM modélise ces effets de façon quasi linéaire et les effets vont dans le même sens que pour le modèle GLMM. C'est-à-dire que plus l'amplitude thermique augmente, plus la mortalité augmente et plus le pH diminue, plus la mortalité augmente.

Il y a aussi certaines différences entre les résultats du modèle GLMM et du modèle GAMM. Si l'on se concentre tout d'abord sur les effets des variables seules, la différence majeure est l'effet très significatif de l'oxygène dans le modèle GLMM qui disparaît dans le modèle GAMM. Le modèle GLMM montre une augmentation de la mortalité avec la diminution de la concentration en oxygène. À l'inverse pour la température moyenne l'effet est significatif dans le modèle GAMM alors qu'il ne l'est pas dans le modèle GLMM. Cependant on ne voit pas de tendance interprétable pour l'effet de la température seule.

Les analyses réalisées n'ont pas permis de mettre en avant un effet direct de la température sur la mortalité. Les mortalités observées sont potentiellement expliquées par l'ensemble des facteurs abiotiques atteignant parfois des valeurs extrêmes durant la période estivale. Les différents modèles utilisés montrent aussi que des interactions se mettent en place entre les facteurs abiotiques.

La mortalité observée est donc multifactorielle. La résilience ou la tolérance des animaux aux conditions environnementales de Pissos n'est donc pas simplement une résilience/tolérance à l'hyperthermie. C'est une résilience face aux variations d'un ensemble de paramètres abiotiques qui ne peuvent être tous parfaitement contrôlés dans ces conditions d'élevage. Une sélection pour la résilience dans la pisciculture de Pissos n'est donc pas strictement une sélection pour la résilience à l'hyperthermie.

b - Effet du poids

L'objectif ici est de déterminer si le poids a un effet sur la survie aux différentes périodes d'élevage, notamment durant la période estivale où les TAC subissent un stress hyperthermique.

Les résultats des modèles de Cox montrent que l'effet du poids est significatif sur la survie (Plus le poids est faible, plus la probabilité de mourir est forte) lors de la période hivernale (du 21 décembre à l'abattage).

Cet effet du poids ne se manifestant que pour la pisciculture de Pissos, on peut donc penser que le poids n'a pas d'effet sur la mortalité dans des conditions thermiques d'élevage stable. De plus, on observe que le poids n'a pas d'effet sur la mortalité estivale. Les individus les plus petits ne semblent donc pas plus sensibles aux fortes températures que les plus gros individus.

Une hypothèse possible est que les conditions estivales créent un écart de poids ou amplifient cet écart entre les individus tolérants et les autres. Avec les effets sociaux, ces écarts continuent à

s'amplifier et deviennent particulièrement important quelques mois plus tard, lors de la période hivernale, ce qui pourrait expliquer la mortalité plus forte.

c - Effet de la ploïdie

Les modèles de Cox montrent que la ploïdie a un effet significatif sur la survie de l'éclosion au marquage, soit jusqu'à 167g de poids moyen (Tableau 1). Durant cette période, les triploïdes ont une probabilité de survie moindre par rapport aux diploïdes. Après le marquage, la ploïdie n'a pas plus d'effet significatif.

Tableau 1 : Résultats des modèles de Cox sur la ploïdie, les valeurs présentées sont celles des triploïdes.

Période	coef	exp(coef)	se(coef)	z value	p value
01/01/2024 – 06/03/2024	0.180	1.198	0.041	4.439	9.02x10 ⁻⁰⁶
06/03/2024 – 22/06/2024	0.488	1.629	0.062	7.862	3.77x10 ⁻¹⁵
22/06/2024 – 12/03/2025	-0.076	0.927	0.127	-0.6	0.548

La ploïdie n'a donc pas d'impact sur la mortalité en période estivale.

2 - Analyse de la croissance

Les résultats montrent une croissance identique des poissons de Brusque par rapport à ceux de Pissos en fonction des degrés jours corrigés par la méthode du TGC (Mallet et al, 1999) avec des valeurs classiques pour la TAC (température minimale de 5°C, maximale de 22°C et optimale de 15°C) jusqu'à fin juin. La croissance devient ensuite supérieure à Brusque pour une somme de degrés jours corrigés similaire. La différence de poids semble se créer lors du mois de juillet puis se maintenir ensuite.

Malgré un poids moyen supérieur de 5.1% des diploïdes par rapport au triploïdes à l'abattage, un modèle linéaire mixte avec le bassin d'élevage en effet aléatoire montre que la différence de poids entre les ploïdies n'est pas significative.

Enfin, le $\ln Var_cohorte$ est significativement plus faible (donc meilleur) à Brusque qu'à Pissos. Les poissons de Brusque ont donc de manière générale une croissance plus homogène que ceux de Pissos.

On sait aussi que les animaux en état de stress voient leur croissance diminuer (Sadoul et Vijayan, 2016). La croissance est donc un paramètre indispensable à prendre en compte pour étudier la tolérance des animaux et pour comparer les sites.

La croissance est meilleure à Brusque qu'à Pissos dû aux conditions thermiques stables et optimales. A Pissos, les faibles températures hivernales et fortes températures estivales auxquelles sont exposés les TAC ralentissent leur croissance. L'effet de la température est aussi confondu avec l'effet du nourrissage puisque le nourrissage diminue voire s'arrête quand les températures sont trop fortes ou trop faibles.

C - Partie Génétique

1 – Poids

Les héritabilités pour les différents poids sont moyennes à fortes variant de 0.33 à 0.59. Les corrélations génétiques entre le poids au marquage et les autres poids à Brusque sont fortes (supérieures à 0.80). Les corrélations génétiques entre le poids au marquage et les autres poids à Pissos varient entre 0.48 à 0.87. Les corrélations génétiques intersites entre le marquage et les deux premières biométries pour des poids moyen équivalents et des âges équivalents se situent aux alentours de 0.50 ~ 0.70. Les corrélations augmentent par la suite, avec des corrélations supérieures à 0.8 pour un PM d'environ 2000g (06/11/2024 à Brusque et 07/01/2025 à Pissos) et entre les deux poids à l'abattage.

Pour la pisciculture de Pissos, L'héritabilité diminue pour les biométries 1 et 2, passant de 0.59 au marquage à 0.41 puis 0.37, avant de remonter ensuite à des valeurs d'environ 0.5. La baisse de l'héritabilité durant la période estivale puis son augmentation ensuite montre un effet temporaire de la période estivale. L'effet environnemental est fort en été, ce qui diminue l'héritabilité mais cet effet environnemental se dissipe ensuite et les héritabilités remontent.

Malgré ces effets forts des différences environnementales et zootechniques la corrélation génétique du poids à l'abattage entre les 2 sites est assez élevée (0.82). Ainsi la sélection effectuée sur le poids à Brusque est efficace pour augmenter le poids à l'abattage à Pissos.

Cela signifie aussi que, sur l'ensemble de la période d'élevage, le classement des meilleures familles pour le poids à l'abattage tend à converger entre Brusque et Pissos malgré des différences fortes en été (corrélation du poids entre Pissos et brusque de 0.62 sur les biométries d'août). La perturbation du classement en été n'est donc que temporaire.

2 – Caractères de résilience et de tolérance

L'héritabilité du Invar cohorte est de 0.07 (± 0.04) à Pissos et de 0.05 (± 0.04) à Brusque. Ce qui est plus faible que les valeurs obtenues par Aththar et al, 2024 et Mengistu et al, 2022 pour *Oreochromis niloticus* (0.10 et 0.12). Cette héritabilité très faible montre que pour cette génération dans ces deux piscicultures et pour ce calcul de Invar, il n'est pas possible de sélectionner pour la résilience sur cet indicateur chez la truite arc-en-ciel.

Tableau 2 : corrélations génétiques inter et intra sites entre le gain estival corrigé et le poids à l'abattage.

Caractère 1	Site 1	Caractère 2	Site 2	Corrélation génétique (rg)	Erreur standard
Gain estival corrigé	Pissos	Gain estival corrigé	Brusque	0.74	0.27
Gain estival corrigé	Pissos	Poids à l'abattage	Brusque	0.16	0.25
Gain estival corrigé	Brusque	Poids à l'abattage	Brusque	0.69	0.12
Gain estival corrigé	Pissos	Poids à l'abattage	Pissos	0.46	0.18

h^2 gain estival corrigé : 0.18 (± 0.056) à Pissos, 0.17 (± 0.055) à Brusque

Le second indicateur de tolérance à l'hyperthermie utilisé, le gain de poids estival corrigé, présente des héritabilités plus élevées que le Invar (0.18 et 0.17, voir tableau 2). Celles-ci sont similaires entre les 2 sites. La corrélation génétique intersites pour le gain estival corrigé est forte (0.74) malgré des conditions environnementales très différentes. La corrélation entre gain estival corrigé et poids à l'abattage est significativement positive dans les deux piscicultures, ce qui veut dire que la sélection pour le poids à l'abattage améliore aussi le gain estival corrigé au sein de la même pisciculture. Le gain estival corrigé semble donc présenter un bon potentiel pour améliorer la tolérance des individus.

Enfin la corrélation entre le gain estival corrigé à Pissos et le poids à l'abattage à Brusque est nulle en prenant en compte l'erreur standard. Ce résultat suggère que la sélection massale à Brusque sur le poids à l'abattage n'aurait potentiellement aucun effet (positif ou négatif) sur la croissance pendant la période estivale.

Il aurait été intéressant d'étudier le caractère survie à la fois sur l'ensemble du cycle d'élevage et sur la période estivale. Cependant les individus morts n'ont pas été génotypés, les paramètres génétiques de la survie n'ont donc pas pu être estimés.

Il convient également de souligné que les températures relevées à l'été 2024 pendant la période d'expérimentation étaient particulièrement clémentes au regard des température observé entre 2023 et en 2025. Ainsi, les conditions à la pisciculture de Pissos n'étaient peut-être pas idéales pour étudier la tolérance à l'hyperthermie.

3 - Stratégies de sélection

Les gains génétiques estimés pour les quatre scénarii de sélection sont montrés dans la figure 3.

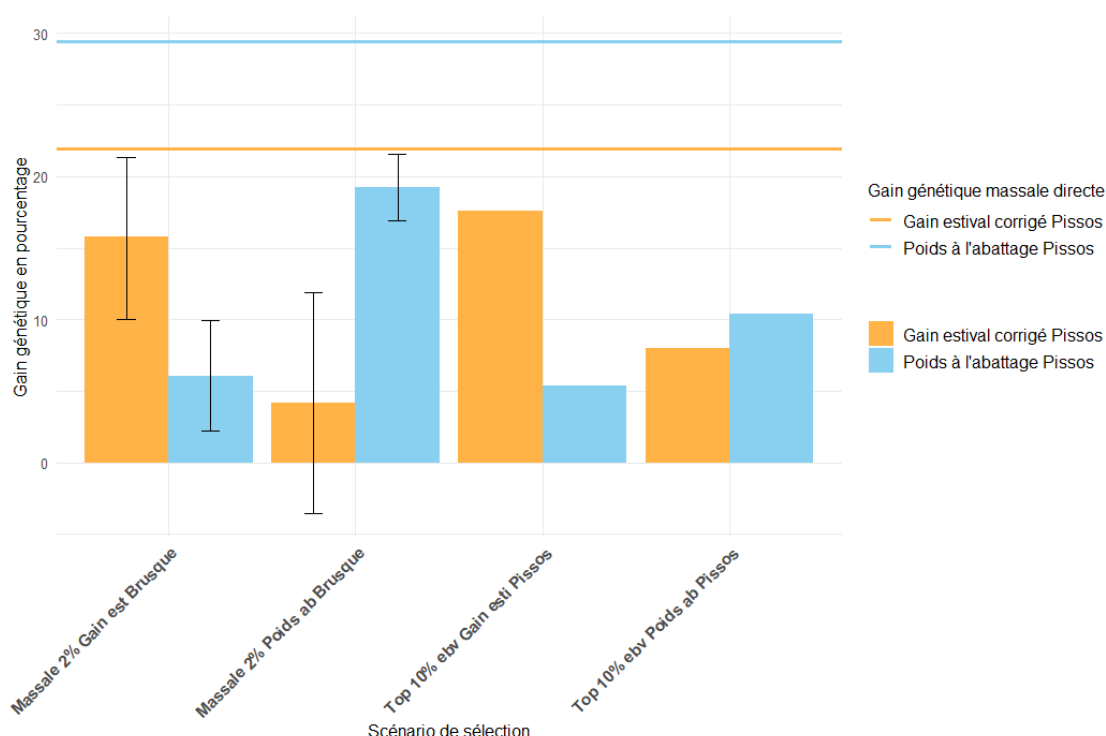


Figure 3 : Gain génétique estimé en pourcentage par rapport à la moyenne du caractère d'intérêt (croissance estivale corrigée ou poids à l'abattage à Pissos) selon différents scénarii de sélection. La ligne jaune (croissance estivale corrigée) et la ligne bleue (poids à l'abattage) représentent le gain génétique attendu en sélection massale (2% de pression) réalisée à Pissos.

Sur la base des résultats obtenus, il paraît pertinent de continuer à réaliser une sélection massale sur le poids comme cela se fait déjà typiquement dans les entreprises de sélection trutticoles françaises, afin d'améliorer le poids à l'abattage dans les piscicultures de production subissant des périodes d'hyperthermie durant l'été et ayant de manière générale des paramètres abiotiques fluctuants, comme la pisciculture de Pissos. Par contre cette sélection massale sur le poids dans la pisciculture de sélection ne permet pas de réaliser un gain sur le caractère gain estival corrigé, pouvant être considéré comme un indicateur de la tolérance des TAC à la période estivale hyperthermique. Afin d'améliorer ce caractère de tolérance, deux scénarios de sélection permettent d'obtenir de bons gains génétiques. La sélection massale sur le gain estival corrigé est un scénario envisageable, cependant la corrélation génétique intersites bien que forte est peu précise. Un autre scénario donne un gain génétique légèrement supérieur, la sélection généalogique sur l'EBV du gain estival corrigé à Pissos. Cette méthode de sélection, bien que nécessitant l'envoi d'un lot sentinelle à Pissos, permettrait d'améliorer significativement le gain de poids dans les conditions estivales de Pissos et donc potentiellement la tolérance à l'hyperthermie. De plus, ce lot sentinelle pourrait n'être élevé que jusqu'à la fin de la période estivale, ce qui réduirait les coûts pour l'entreprise de sélection par rapport à un lot sentinelle classique.

V – Conclusion

Dans la pisciculture de Pissos, la mortalité n'est pas due uniquement à l'hyperthermie. Un ensemble de facteurs abiotiques rentrent en jeu en plus de la température : l'amplitude thermique journalière, le pH et la concentration en O₂. On peut notamment voir que l'augmentation de l'amplitude thermique et que la diminution du pH augmente la mortalité. Le poids des poissons à partir du marquage et surement plus particulièrement la déviation du poids à un effet significatif sur la mortalité dans l'environnement de Pissos, plus particulièrement en hiver. Plus le poids est faible et les déviations négatives et élevées, plus la mortalité est forte. Enfin, les poissons triploïdes ont une moins bonne survie jusqu'au marquage soit environ 170g de poids moyen. Au-delà, et notamment durant la période estivale, diploïdes et triploïdes ont la même survie et aussi la même croissance. L'élevage de poissons triploïdes en conditions hyperthermiques ne provoque donc pas de surmortalité ni de déficit de poids. Un tri de remise en compétition des poissons régulier pourrait surement améliorer la survie des individus les plus petits dans les conditions de Pissos en diminuant l'effet de la dominance.

Même si les conditions estivales de Pissos perturbent le classement des individus, cette perturbation semble temporaire et les poissons retrouvent un classement similaire à celui de Brusque après avoir retrouvés des conditions plus optimales, la corrélation génétique intersites du poids à l'abattage est donc forte. Cette forte corrélation permet d'effectuer de bons gains génétiques sur le poids à l'abattage à Pissos en sélectionnant à Brusque. La corrélation génétique faible et les estimations des gains génétiques montrent que la sélection massale déjà effectuée sur le site de Brusque permet d'améliorer le poids à l'abattage à Pissos mais ne permet pas d'améliorer le gain estival corrigé à Pissos et donc la tolérance à l'hyperthermie. Pour cela il serait pertinent de réaliser une sélection généalogique des candidats de Brusque sur les EBV du gain estival corrigé à Pissos qui pourraient être obtenues avec un lot sentinelle sur Pissos.

Bibliographie

- Aththar, M.H.F. et al. (2024) « Log Transformed Variance (Lnvar) from Individual Growth Curves as a Potential Indicator of Resilience in Nile Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) ». Rochester, NY: Social Science Research Network. Available at: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4890363>.
- Bear, E.A., McMahon, T.E. and Zale, A.V. (2007) 'Comparative Thermal Requirements of Westslope Cutthroat Trout and Rainbow Trout: Implications for Species Interactions and Development of Thermal Protection Standards', *Transactions of the American Fisheries Society*, 136(4), pp. 1113–1121. Available at: <https://doi.org/10.1577/T06-072.1>.
- Berghof, T.V.L., Bovenhuis, H. and Mulder, H.A. (2019a) 'Body Weight Deviations as Indicator for Resilience in Layer Chickens', *Frontiers in Genetics*, 10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01216>.
- Berghof, T.V.L., Poppe, M. and Mulder, H.A. (2019b) 'Opportunities to Improve Resilience in Animal Breeding Programs', *Frontiers in Genetics*, 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00692>.
- Colditz, I.G. and Hine, B.C. (2016) 'Resilience in farm animals: biology, management, breeding and implications for animal welfare', *Animal Production Science*, 56(12), pp. 1961–1983. Available at: <https://doi.org/10.1071/AN15297>.
- Crichigno, S.A. and Cussac, V.E. (2019) 'Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) adaptation to a warmer climate: the performance of an improved strain under farm conditions', *Aquaculture International*, 27(6), pp. 1869–1882. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00438-7>.
- FAO (2024) *La Situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2024*. FAO ; Available at: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd0683fr> (Accessed: 21 May 2025).
- Hokanson, K.E.F., Kleiner, C.F. and Thorslund, T.W. (1977) 'Effects of Constant Temperatures and Diel Temperature Fluctuations on Specific Growth and Mortality Rates and Yield of Juvenile Rainbow Trout, *Salmo gairdneri*', *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34(5), pp. 639–648. Available at: <https://doi.org/10.1139/f77-100>.
- Jiang, X. et al. (2021) 'Effects of temperature, dissolved oxygen, and their interaction on the growth performance and condition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)', *Journal of Thermal Biology*, 98, p. 102928. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102928>.
- Mengistu, S.B. et al. (2022) 'Fluctuations in growth are heritable and a potential indicator of resilience in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)', *Aquaculture*, 560, p. 738481. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738481>.
- Molony, B.W., Church, A.R. and Maguire, Greg.B. (2004) 'A comparison of the heat tolerance and growth of a selected and non-selected line of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, in Western Australia', *Aquaculture*, 241(1–4), pp. 655–665. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.08.030>.
- Présentation du Plan aquacultures d'avenir 2021-2027 (2022) Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Available at: <https://agriculture.gouv.fr/presentation-du-plan-aquacultures-davenir-2021-2027> (Accessed: 21 May 2025).
- Reid, G. et al. (2019) « Climate change and aquaculture: considering adaptation potential », *Aquaculture Environment Interactions*, 11, p. 603-624. Available at: <https://doi.org/10.3354/aei00333>.

Rodnick, K.J. *et al.* (2004) 'Thermal tolerance and metabolic physiology among redband trout populations in south-eastern Oregon', *Journal of Fish Biology*, 64(2), pp. 310–335. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2004.00292.x>.

Sadoul, B. and Vijayan, M.M. (2016) '5 - Stress and Growth', in C.B. Schreck *et al.* (eds) *Fish Physiology*. Academic Press (Biology of Stress in Fish), pp. 167–205. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802728-8.00005-9>.