

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**EFFET DE LA SÉLECTION POUR LA CROISSANCE ET
L'ABSENCE DE MATURITÉ SEXUELLE PRÉCOCE SUR
LE SUCCÈS REPRODUCTEUR DE L'OMBLE DE
FONTAINE (*SALVELINUS FONTINALIS*)**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© HAMZA SEGHOANI

Décembre 2010

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Composition du jury :

Réjean Tremblay, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Céline Audet, directrice de recherche, Université du Québec à Rimouski

Nicolas Derome, codirecteur de recherche, Université Laval

Jöel de la Noüe, examinateur externe, Université Laval

Dépôt initial le 22 septembre 2010

Dépôt final le 20 décembre 2010

À la mémoire de mes grands parents.

REMERCIEMENTS

Il m'est agréable au terme de ce travail, d'adresser mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

J'exprime ma profonde reconnaissance à ma directrice de mémoire, la Dre Céline Audet de l'Institut des sciences de la mer de Rimouski, qui m'a accueilli dans son laboratoire et mis à ma disposition les moyens nécessaires à l'accomplissement de mon projet de maîtrise. Mais aussi pour m'avoir fait bénéficier de sa longue expérience dans le domaine et pour ses corrections enrichissantes.

J'adresse mes sincères remerciements au Dr Nicolas Derome qui a bien voulu accepter de codiriger ce travail; pour sa disponibilité et ses précieux conseils.

Il m'est agréable de remercier le Dr Réjean Tremblay qui m'a fait l'honneur de présider mon jury malgré ses lourdes responsabilités.

Je remercie également le Dr Joël de la Noüe, examinateur externe. Il m'a fait l'honneur d'examiner ce travail, je l'en remercie vivement pour toutes les remarques et corrections utiles qui pourront me servir tout au long de ma carrière.

Que mes grands parents, mes parents, mon frère et ma sœur trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et mon éternelle affection pour leur dévouement et leur soutien durant toutes ces années.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce mémoire est de vérifier si l'application d'un programme de sélection pour la croissance et l'absence de la maturité sexuelle précoce a eu un effet indirect sur le succès reproducteur de l'Ombre de fontaine (souche Laval). Pour ce faire, nous avons comparé quatre indicateurs du succès reproducteur chez deux lignées (sélectionnée et témoin) et pour deux générations (F3, F4) : diamètre des œufs, fécondité relative, qualité de la laitance, mortalité des œufs à 24h, après l'éclosion et jusqu'à la première alimentation. Les concentrations plasmatiques de deux stéroïdes sexuels, 17 β -estradiol et testostérone, ont été suivies tout au long de la période de maturation des gonades chez les femelles. Chez ces dernières, la concentration hépatique de la vitellogénine a également été mesurée.

Dans un premier temps, des suivis ont été faits chez la lignée pour laquelle la sélection a été appliquée et chez une lignée témoin pour laquelle les croisements ont toujours été faits au hasard d'une génération à l'autre. Pour les deux générations, aucun effet indirect sur le succès reproducteur n'a été noté chez les poissons issus de la lignée sélectionnée. De même aucune différence significative du patron saisonnier de la 17 β -estradiol, de la testostérone et de la vitellogénine n'a été détectée entre les deux lignées.

Comme la lignée sélectionnée fait également l'objet d'un suivi en entreprise et que le producteur a observé des différences de succès reproducteur entre ses animaux et ceux suivis à l'ISMER, le second objectif de cette étude est de vérifier l'effet du milieu d'élevage sur le succès reproducteur. Pour ce faire, nous avons comparé des géniteurs élevés à Pointe-au-Père (2 à 15°C) et d'autres maintenus à Aquaculture Forestville (6°C). Les résultats indiquent que le milieu d'élevage influence de façon significative le succès reproducteur. La fécondité relative était plus élevée chez les femelles maintenues à température constante (6°C), alors que le diamètre des œufs était plus petit que celui des œufs des femelles maintenues à température variable (2 à 15°C). Les concentrations de 17 β -estradiol et de

testostérone étaient plus élevées chez les géniteurs maintenus à température constante par rapport à ceux à température variable.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	V
RÉSUMÉ.....	VI
TABLE DES MATIERES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I. EFFET DE LA SELECTION POUR LA CROISSANCE ET L'ABSENCE DE MATURITÉ SEXUELLE PRÉCOCE SUR LE SUCCES REPRODUCTEUR CHEZ L'OMBLE DE FONTAINE (<i>SALVELINUS FONTINALIS</i>)	8
I.1 INTRODUCTION.....	9
I.2 MATERIEL ET METHODES.....	13
I.3 RESULTATS	19
I.4 DISCUSSION.....	28
CHAPITRE II. EFFET DU MILIEU D'ELEVAGE SUR LE SUCCES REPRODUCTEUR CHEZ L'OMBLE FONTAINE (<i>SALVELINUS FONTINALIS</i>).....	32
II.1 INTRODUCTION.....	33
II.2 MATERIEL ET METHODES.....	35
II.3 RESULTATS	39
II.4 DISCUSSION.....	45
DISCUSSION GÉNÉRALE.....	48
RÉFÉRENCES CITEES.....	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Caractéristiques morphologiques des géniteurs au moment du frai en fonction de lignée et de la génération.....	14
Tableau I.2 Fécondité relative et diamètre des œufs en fonction de la lignée et de la génération.....	21
Tableau I.3 Concentration en spermatozoïdes du sperme, diamètre des spermatozoïdes, osmolarité et concentration en glucose du plasma séminal ainsi que le pourcentage de fécondation en fonction de la lignée et de la génération...	26
Tableau I.4 Suivi familial des jeunes stades pour les deux lignées (sélectionnée et témoin) et pour les deux générations.....	27
Tableau II.1 Caractéristiques morphologiques des géniteurs au moment du frai en fonction du lieu d'élevage et de la génération.....	35
Tableau II.2 Fécondité relative et diamètre des œufs en fonction du lieu d'élevage et de la génération.....	40
Tableau II.3 Concentration en spermatozoïdes du sperme, diamètre des spermatozoïdes, osmolarité et concentration en glucose du plasma séminal en fonction du lieu d'élevage et de la génération.....	44

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1** L'indice gonadosomatique (A) et l'indice hépatosomatique (B) chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la 4^{ème} génération.....20
- Figure I.2** Concentrations mensuelles de la testostérone chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la 3^{ème} génération (A) et de la 4^{ème} (B) génération.....22
- Figure I.3** Concentrations mensuelles de l'estradiol chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la 3^{ème} génération (A) et de la 4^{ème} (B) génération.....24
- Figure I.4** Concentrations mensuelles de la vitellogénine hépatique chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la génération 4.....25
- Figure II.1** Variations annuelles de la température de l'eau douce aux deux lieux d'élevage (Pointe-au-Père, Forestville), durant l'année 2008 – 2009.....36
- Figure II.2** Concentrations mensuelles de la testostérone (A) et du 17 β -estradiol (B) chez les femelles F3 maintenues dans deux milieux d'élevage différents.....41
- Figure II.3** Concentrations mensuelles de la testostérone (A) et du 17 β -estradiol (B) chez les femelles F4 élevées aux deux sites d'élevage.....43

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Ombre de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) est la principale espèce de salmonidés produite au Québec (MAPAQ 2009) où la production est presque essentiellement tournée vers la pêche sportive (MAPAQ 2009).

En 1993, moins de 1% de la production aquacole mondiale s'appuyait sur des souches d'élevage améliorées génétiquement (Gjedrem 1997). Le développement et la mise en disponibilité auprès des producteurs de souches performantes, pour des traits identifiés par l'industrie, s'avère un atout certain pour l'amélioration de la compétitivité de l'industrie québécoise. Les travaux de sélection entrepris sur la souche Laval, une souche anadrome d'Ombre de fontaine, visent le développement de la croissance combiné à l'élimination de la maturité sexuelle précoce (Audet et al. 1997). En effet, la croissance rapide en milieu de production est souvent associée à une maturation sexuelle précoce, principalement chez les mâles, ce qui diminue la qualité de la chair durant la période de maturation et de reproduction. Une maturation sexuelle tardive serait donc à l'avantage des producteurs et permettrait aux poissons d'atteindre la taille commerciale plus rapidement, les poissons investissant leur énergie majoritairement dans la croissance plutôt que dans la gamétogenèse (Aksnes et al. 1986; Gjerde 1986).

Le programme et la méthode de sélection

La rivière Laval est située sur la Côte-Nord, près de Forestville (Québec) et se déverse dans l'estuaire du St-Laurent. Les ombles de la rivière Laval ont été choisis pour ce programme de sélection parce qu'ils présentaient, en milieu naturel, des caractéristiques de croissance et de maturation sexuelle laissant entrevoir un fort potentiel comme souche d'élevage.

Une sélection génétique combinée a été appliquée sur cette souche. Un tel programme fait intervenir la composante familiale et intrafamiliale, prenant en compte la supériorité d'un individu par rapport à sa famille, mais aussi la supériorité de la famille par rapport aux autres familles. La sélection a été appliquée en deux temps : éliminer les individus sexuellement matures à 1+, puis parmi les individus immatures à 1+, on sélectionne les individus à plus forte croissance. Cette sélection permet de conserver le maximum de variabilité génétique tout en étant relativement efficace (Bastien et al. 2010). Dans le cas de la souche Laval, la sélection individuelle aurait occasionné trop de risques de consanguinité et de perte de diversité étant donné le nombre limité de géniteurs sauvages à l'origine des travaux (Bastien et al. 2010).

L'effet de la sélection

Le programme de sélection sur la souche Laval d'omble de fontaine a démontré qu'il était possible d'améliorer la lignée sélectionnée pour les traits économiques ciblés. Les travaux de Bastien et al. (2010) démontrent clairement qu'il est possible à la fois d'améliorer la croissance tout en réduisant l'incidence de la maturité sexuelle précoce et que les gains obtenus après seulement deux générations de sélection laissent envisager un avenir prometteur pour un tel programme de sélection. L'objectif général de l'étude de Bastien était d'évaluer, après deux générations, la performance des ombles de fontaine issus du programme de sélection chez la lignée Laval. Pour ce faire, elle a comparé le gain génétique attribuable à la sélection dirigée à celui obtenu par simple domestication (lignée témoin) pour la croissance et l'absence de la maturité sexuelle précoce (Bastien 2010). Ses résultats ont montré qu'il était possible d'améliorer la croissance des animaux sélectionnés d'une génération à l'autre tout en réduisant la maturité sexuelle précoce. Cette amélioration est essentiellement due au programme de sélection et non pas à la domestication, comme le démontrent les résultats obtenus chez les individus domestiqués.

Un programme de sélection pour un trait donné peut occasionner une hausse ou une baisse de performance pour un autre trait (Falconer et Mackay 1996). Ainsi, certains

auteurs ont montré une corrélation positive entre le poids et la résistance aux maladies bactériennes chez la Truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) (Silverstein et al. 2009) ou entre le poids et le niveau de cortisol suite à un stress (Lankford et Weber 2006).

Le succès reproducteur

Le succès reproducteur peut être défini par plusieurs critères incluant la fécondité et la qualité des œufs chez les femelles et la qualité de la laitance et le pourcentage de fécondation chez les mâles. La qualité des œufs est critère important pour l'industrie piscicole. En effet, selon Lahnsteiner et Patarnello (2004b, 2005), la qualité des œufs est l'un des critères importants permettant de mesurer la performance chez les espèces en captivité. Elle se définit comme étant la capacité de l'œuf à être fécondé et à fournir à l'embryon les éléments nécessaires à son bon développement (Kjorsvik et al. 1990; Brooks et al. 1997; Bobe et Labbé 2010). Plusieurs indices pour évaluer la qualité du succès reproducteur chez les femelles ont été développés incluant la fécondité des femelles et les caractéristiques morphologiques et biochimiques des œufs (Kjorsvik et al. 1990; Fernandez-Palacios et al. 1995 ; Brooks et al. 1997; Shields et al. 1997; Nocilliano et al. 2000). Bromage et al. (1992) définissent la fécondité relative des femelles comme étant le nombre d'œufs produits par kilogramme de masse fraîche. La taille de l'œuf est elle aussi un critère important de sa qualité, puisqu'elle peut influencer la taille des alevins (Wallace et Aasjord 1984), les plus gros œufs donnant naissance à de plus gros alevins qui ont plus de chances de survie. Évidemment, la qualité biochimique des œufs est un critère d'importance puisqu'elle rend compte de la capacité à fournir aux embryons les éléments essentiels à leur développement non seulement jusqu'à l'éclosion, mais également jusqu'à la résorption du sac vitellin (Kjorsvik et al. 1990 ; Bobe et Labbé 2010).

Chez les mâles, la qualité du sperme peut affecter directement le pourcentage de fécondation et la production d'embryons viables (Bromage et Roberts 1995 ; Papadaki et al. 2008 ; Bobe et Labbé 2010). Chez les Téléostéens, l'osmolarité et la composition ionique du plasma séminal sont des facteurs clés dans la détermination de la qualité du sperme

(Valdebenito et al. 2009). Plusieurs études ont souligné les effets de l'osmolarité sur la motilité des spermatozoïdes chez les Téléostéens marins et d'eau douce (Cosson et al. 1999 ; Darszon et al. 1999). Chez certains Téléostéens d'eau douce comme la Perche commune (*Perca fluviatilis*), la motilité des spermatozoïdes est supprimée par une osmolarité élevée (Lahnsteiner et al. 1995). Un mécanisme similaire d'inhibition osmotique de la motilité des spermatozoïdes existe également chez les Cyprinidés (Lahnsteiner et al. 2004a). Chez les Salmonidés, une osmolarité élevée du plasma séminal peut causer la déformation des spermatozoïdes lors de leur émission (Alavi et Cosson 2006). La concentration de spermatozoïdes dans le plasma séminal est également un facteur déterminant de la qualité du sperme, puis qu'elle influence directement le pourcentage de fécondation.

Les stéroïdes sexuels et la vitellogénine

Au cours du développement des ovaires, l'épithélium germinatif produit les follicules caractéristiques du tissu ovarien. Les cellules folliculaires sont responsables de la synthèse des stéroïdes au sein de l'ovaire et synthétisent le 17 β -estradiol après stimulation par l'hormone gonadotrope FSH produite par l'hypophyse (Holland et al. 2000 ; Mellinger 2002 ; Ohta et al. 2002 ; Montserrat et al. 2004). Une fois libéré dans le sang, le 17 β -estradiol induit la sécrétion de la vitellogénine par le foie (Patiño et Sullivan 2002 ; Hennies et al. 2003; Montserrat et al. 2004 ; Frantzen et al. 2008). La vitellogénine est une phospholipoprotéine qui se lie à un récepteur spécifique à la surface de l'ovocyte (Patiño et Sullivan 2002 ; Hennies et al. 2003) et l'internalisation de ces récepteurs va permettre l'entrée de la vitellogénine dans l'ovocyte (Patiño et Sullivan 2002 ; Hennies et al. 2003). La vitellogénine sera alors accumulée dans l'ovocyte constituant ainsi les réserves nécessaires au développement embryonnaire et post-embryonnaire qui assurent la viabilité de l'embryon et de l'alevin vésiculé (Kwon et al. 2001). L'autre stéroïde d'importance dans la régulation de la maturation sexuelle chez les femelles est la testostérone, mais plusieurs auteurs reconnaissent que son rôle chez les femelles de Salmonidés et d'autres espèces de Poissons téléostéens n'est pas très bien compris (Frantzen et al. 1997). La testostérone a été

proposée comme un précurseur pour la synthèse du 17β -estradiol par aromatisation dans les cellules granuleuses de la couche folliculaire (Omble chevalier (*Salvelinus alpinus*), Frantzen et al. 1997). Elle serait également responsable du maintien du comportement sexuel et de la production de gonadotropine au cours de l'ovulation. Kortner et al. (2008) suggèrent que la testostérone joue un rôle important dans la régulation de la croissance au début de la formation des ovocytes avec des conséquences potentielles sur la fécondité.

L'effet de la température sur le succès reproducteur

Chez les ectothermes, d'importantes fonctions physiologiques comme la croissance, la nage et le métabolisme de base fonctionnent de façon optimale à des conditions de température spécifiques à l'espèce. Ainsi, chez le Poisson rouge (*Carassius auratus*), une augmentation de la température provoque aussi une augmentation de la croissance, indépendamment de la photopériode (Marchant et Peter 1986); chez le Corégone (*Coregonus clupeaformis*) et le Cisco (*Coregonus artedii*), le courant et la température ont un effet direct sur le métabolisme de base et la capacité de nage (Bernatchez et Dodson 1985), alors que chez les larves de Vertébrés ectothermes, le rendement et le coût énergétique de la nage changent en fonction du régime thermique (e.g. Johnston et Temple 2002). Ainsi, lorsque les Poissons sont exposés aux variations thermiques, ils peuvent optimiser leur performance en modifiant leur comportement ou leur physiologie. Chez les Poissons des zones tempérées, les conditions thermiques peuvent avoir une profonde influence sur la régulation hormonale, la croissance des gonades, le moment du frai ainsi que sur le développement embryonnaire (Pankhurst et King 2010).

Les Salmonidés frayent généralement en automne et en hiver et le développement des gonades débute dès le printemps et se poursuit durant l'été pour se terminer par l'ovulation et la spermiation à l'automne. Donc, le succès reproducteur peut être influencé par les conditions thermiques et cela surtout durant le développement gamétique et au moment de l'ovulation. En effet, selon Mackay et Lazier (1993) les faibles températures retardent généralement la vitellogenèse et la croissance des ovocytes chez la Truite arc-en-

ciel, mais l'effet de la température élevée est plus variable. De plus, l'effet des changements thermiques dépend de l'espèce et du stade de reproduction (Khan et al. 1997) ainsi que des facteurs régulateurs impliqués dans la reproduction (Van Der Kraak et Pankhurst 1997). Les études sur la Truite arc-en-ciel (Pankhurst et al. 1996), l'Ombre chevalier (Gillet 1991), le Saumon atlantique (*Salmo salar*) (Taranger et Hansen 1993 ; King et Pankhurst 2000) et le Loup de mer (*Anarhichas lupus*) (Pavlov et Mokness 1994), indiquent après un examen de la qualité des œufs, que l'exposition des géniteurs à une température élevée se traduit par des troubles de la maturation ovocytaire finale et de l'ovulation. Cependant, selon King et al. (2003) les premiers processus du cycle de reproduction peuvent également être affectés. Par exemple, les concentrations plasmatiques de 17β -estradiol et de vitellogénine diminuent chez le Saumon atlantique, lorsqu'il est maintenu à des températures élevées durant les périodes intenses de vitellogenèse (King et al. 2003). Les mêmes auteurs suggèrent que les températures élevées durant la phase de vitellogenèse peuvent avoir un effet significatif sur la fécondation et la survie des œufs.

Selon Atse et al. (2002) la contribution maternelle au succès reproducteur chez l'Ombre chevalier est meilleure en eau froide qu'en eau chaude, amélioration observée au niveau de la fécondité, du diamètre des œufs, de la viabilité des œufs et des alevins. Chez d'autres Téléostéens, comme le Loup, les conditions thermiques pendant la saison de reproduction influencent de façon significative la qualité des œufs (Tveiten et al. 2001). Chez les Salmonidés, en plus des facteurs abiotiques, d'autres caractéristiques biotiques ont été rapportées chez les Salmonidés comme étant associées à la taille des œufs. Brooks et al. (1997) indiquent que la qualité des œufs est fonction des conditions environnementales ou de l'habitat naturel des femelles. Ainsi, la température, le pH et la salinité sont, entre autres, des facteurs physico-chimiques de l'eau influant sur la qualité des œufs. Il en est ainsi de la taille des femelles (Wotton 1992), de leur âge et du régime alimentaire pendant le développement des gonades (Billard 1992). Une étude préliminaire a montré chez les femelles de Saumon atlantique, d'Ombre chevalier et de Truite arc-en-ciel que des températures élevées pouvaient diminuer la qualité des œufs (King et al. 2003).

Chez les mâles, Atse et al. (2002) indiquent que la température ne semble pas affecter la qualité du sperme chez l'Omble chevalier, alors que la salinité augmenterait la concentration en spermatozoïdes. Les mêmes auteurs indiquent les bénéfices de la température froide et de l'élevage estival en eau de mer pour diminuer le stress thermique et améliorer le succès reproducteur chez cette espèce. Il y a peu d'études, à notre connaissance, qui portent sur l'évolution de la qualité du sperme en réponse à la température d'élevage des géniteurs. Chez la Truite arc-en-ciel, les géniteurs transférés à une température inférieure à leur température froide d'élevage (5°C) affichent une composition lipidique légèrement différente de celle des poissons acclimatés à une température chaude (13°C) (Labbé et Maisse 1996). En outre, Müller et al. (2008) indiquent chez la Truite arc-en-ciel, que la qualité du sperme après congélation-décongélation est meilleure chez des poissons acclimatés au froid par rapport aux poissons acclimatés à des températures plus chaudes. L'effet de cette acclimatation à la température n'est plus détecté deux mois après le changement de température. Toutefois, ces effets de la température n'ont pas été testés sur des spermatozoïdes frais (Müller et al. 2008).

Dans le cadre de ce mémoire, deux objectifs principaux sont poursuivis.

Le premier objectif est de vérifier si la sélection dirigée vers la croissance et l'absence de maturité sexuelle précoce a eu un effet négatif sur le succès reproducteur des géniteurs de deux générations (F3, F4).

Le deuxième objectif est de vérifier l'effet de milieux d'élevage caractérisés par des profils thermiques différents (température variable [2 à 15°C] et constante [6°C]) sur le succès reproducteur de l'Omble de fontaine. Notre hypothèse est que les femelles maintenues à température froide toute l'année auront des œufs de moindre qualité, donc un plus faible succès reproducteur.

CHAPITRE 1. EFFET DE LA SÉLECTION POUR LA CROISSANCE ET
L'ABSENCE DE MATURITÉ SEXUELLE PRÉCOCE SUR LE SUCCÈS
REPRODUCTEUR CHEZ L'OMBLE DE FONTAINE (*SALVELINUS FONTINALIS*)

1.1 INTRODUCTION

Comme pour les autres espèces d'élevage, la recherche d'un fort taux de croissance et une incidence réduite de la maturation sexuelle précoce sont des objectifs de production d'élevage standards (Omble chevalier, Nilsson 1992 ; Saumon chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*), Winkelman et Peterson 1994 ; Saumon atlantique, Gjedrem 2000 ; Truite arc-en-ciel, Kause et al. 2003). Chez les Salmonidés, la croissance et l'absence de maturité sexuelle précoce sont les principaux traits d'intérêt identifiés par l'industrie aquacole québécoise. Une maturité sexuelle tardive permet aux poissons d'atteindre la taille commerciale plus rapidement, puisqu'ils investissent alors leur énergie principalement dans la croissance plutôt que dans la gamétogenèse (e.g. Gjerde 1986 ; saumon Atlantique, Aksnes et al. 1986). Pour répondre aux besoins de l'industrie, un programme de sélection génétique a été entrepris en utilisant une souche d'Omble de fontaine anadrome (Savaria 1998). De la 2^{ième} à la 3^{ième} génération, la masse moyenne des poissons issus du programme de sélection a augmenté de plus de 30% et la proportion des poissons immatures a augmenté de 32 à 60% (Bastien et al. 2010). Il est donc possible, par un programme de sélection combinée, d'accroître la croissance tout en diminuant la maturité sexuelle précoce. Les gains rapidement obtenus après trois générations de sélection laissent envisager un avenir prometteur pour ce type de programme de sélection. En revanche, comme dans tout programme d'optimisation de la production, des effets indirects sur d'autres traits phénotypiques pourraient être présents.

Depuis longtemps, l'impact de la sélection a suscité un questionnement chez les éleveurs et les biologistes et plusieurs paramètres ont été établis chez les bovins, les poules, le maïs ainsi que chez d'autres animaux et plantes. Chez les poissons, l'efficacité de sélections dirigées a été démontrée pour certains paramètres tels que la croissance

(Tilapia (*Oreochromis niloticus*), Charo-Karisa et al. 2006 ; Omble de fontaine, Bastien et al. 2010), l'absence de la maturité sexuelle (Omble de fontaine, Bastien et al. 2010) et la résistance aux infections bactériennes (Truite arc-en-ciel, Silverstein et al. 2009).

La sélection appliquée pour un trait spécifique (directe) peut occasionner la modification d'un autre trait (indirecte), ces deux traits étant liés (Falconer and Mackay 1996 ; Roff 1997). Ainsi, la présence d'une corrélation positive entre le poids et le niveau de cortisol observé suite à un stress a été démontrée chez la Truite arc-en-ciel (Lankford et Weber 2006) et entre le poids et la résistance aux maladies bactériennes en eau froide chez la même espèce (Silverstein et al. 2009). La relation entre la masse et l'absence de la maturité sexuelle précoce a déjà l'objet d'études. Ainsi, Nilsson et al. (1992) ont montré qu'il existe une corrélation génétique positivement faible entre le poids, la longueur et la maturité sexuelle. Par contre, l'effet de ces traits sur le succès reproducteur chez les Poissons ne semble pas avoir été étudié. Il s'avère donc utile de vérifier si la sélection dirigée influence indirectement le succès reproducteur chez des Poissons issus du programme de sélection.

Le développement de l'ovaire chez les Labridés (*Pseudolabrus sieboldi*) et le recrutement de jeunes ovocytes chez les Téléostéens sont régulés par les gonadotropines hypophysaires à travers la production de stéroïdes ovariens (Ohta et al. 2001). Chez le Tilapia (*Oreochromis mossambicus*), Sparks et al. (2003) ont montré que les stéroïdes sexuels étaient impliqués dans la croissance et la survie des embryons. Kortner et al. (2008) ont également suggéré que la testostérone pourrait jouer un rôle important dans la régulation de la croissance chez la Morue au début de la formation des ovocytes avec des conséquences potentielles sur la fécondité, elle-même directement liée au succès reproducteur. Chez les femelles du Loup (*Dicentrarchus labrax*), le 17 β -estradiol est la principale hormone stéroïdienne induisant la sécrétion de vitellogénine dans le foie (Frantzen et al. 2008). Après sa sécrétion dans le sang, la vitellogénine est déposée dans l'ovaire où elle est incorporée aux ovocytes en développement. Chez les Poissons, comme

chez les autres vertébrés ovipares, la vitellogénine est nécessaire pour la croissance de l'ovocyte tout en contribuant à la qualité de l'œuf (Kwon et al. 2001; Maitra et al. 2007; Ankley et al. 2008). Miller et al. (2007) indiquent que la vitellogénine plasmatique est la clé de la production des œufs chez les femelles ovipares (*Pimephales promelas*) et qu'en conséquence, les changements d'induction de cette phospholipoprotéine peuvent servir d'indicateur du succès reproducteur. De plus, la taille et l'apparence des œufs non fécondés peuvent être utilisées pour évaluer ou estimer le potentiel global de développement des œufs après la fécondation (e.g. Bobe et Labbé 2010). Chez les Salmonidés en élevage, il a été démontré que l'état nutritionnel des femelles pendant la croissance ovarienne, l'âge à la maturation et le poids affectent la fécondité, la taille et la composition biochimique des œufs à l'ovulation (e.g. Tyler et Sumpter 1996).

La qualité des gamètes demeure un critère important dans la reproduction des poissons puisqu'elle détermine la survie embryonnaire. Chez les mâles, la qualité du sperme a souvent été estimée par la concentration en spermatozoïdes (Suquet et al. 1992). Chez la Truite arc-en-ciel (Malejac et al. 1990) et la Truite caspienne (*Salmo trutta caspius*) (Hajirezaee et al. 2010), la qualité du sperme a été évaluée en utilisant des critères comme la concentration en spermatozoïdes, l'osmolarité et la concentration en glucose dans le plasma séminal.

Le programme de sélection, entrepris en 1994 dans le laboratoire d'aquaculture à l'ISMER, avec une souche indigène d'Omble de fontaine (souche Laval), avait comme double objectif de sélectionner pour une croissance accrue et l'élimination de la maturité sexuelle précoce (Savaria 1998). Depuis le début de la sélection (1994), deux lignées ont été maintenues en parallèle : une lignée issue de la sélection et une lignée témoin. Pour la lignée témoin, tous les croisements ont été effectués au hasard. De façon qualitative, les données des dernières années semblent indiquer qu'il pourrait y avoir une baisse du succès reproducteur chez les animaux de la lignée sélectionnée. L'objectif de cette étude est de comparer le succès reproducteur des géniteurs issus du programme de sélection avec ceux de la lignée témoin afin d'évaluer l'impact de la sélection combinée pour l'absence de

maturité sexuelle précoce et une croissance accrue sur ce trait phénotypique. Pour y parvenir, différents indicateurs ont été utilisés tels, le suivi des hormones sexuelles, la qualité des œufs, la qualité de la lactance, le pourcentage de fécondation, la mortalité 24h après fécondation et les pourcentages de survie chez les jeunes stades de développement (éclosion, première alimentation).

1.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Élevage de géniteurs

Les expériences ont été menées en 2007, 2008 et 2009, à la station aquicole de Pointe-au-Père (UQAR-ISMER) avec des géniteurs d’Omble de fontaine issus de la souche anadrome de la rivière Laval. Les poissons étudiés provenaient des 3^{ème} (F3) et 4^{ème} (F4) générations produites en milieu contrôlé. L’âge des géniteurs était différent entre les deux générations, les géniteurs de la F3 étaient âgés de 4 ans au moment du suivi, alors que ceux de la F4 avaient 2 ans. Les masses et longueurs des géniteurs sont présentées au Tableau 1.1. Lors des suivis effectués sur les géniteurs, ceux-ci étaient gardés dans des bassins circulaires de 1500 litres et nourris avec une moulée de croissance flottante (Corey Aquafeed (moulée 7.5mm, 45% protéines, 20% lipides, 1.5% fibres, 9% humidité) à raison de 1% du poids corporel par jour. Ils ont été maintenus sous une photopériode naturelle et une température saisonnière (2° à 15°C), en eau douce, du mois d’octobre au mois de mai avec un transfert en eau de mer (20 PSU [Practical Salinity Unit]), du mois de juin au mois de septembre. Le transfert en eau de mer a permis non seulement de limiter la hausse maximale saisonnière de température à 15°C et ainsi limiter les infections opportunistes dues aux températures élevées, mais aussi à mimer les migrations trophiques des Ombles anadromes. Pour la génération F3, la période de reproduction a eu lieu au mois de novembre 2007 et pour la génération F4 au cours du mois de novembre 2009.

Tableau 1.1. Caractéristiques morphologiques des géniteurs au moment du frai en fonction de lignée et de la génération.

Génération	Lignée	n	Sexe	Masse (kg)	Longueur (cm)
F3	S	14	F	2,03 ± 0,40	49,4 ± 3,4
		18	M	2,50 ± 0,50*	53,3 ± 2,3*
	T	20	F	1,85 ± 0,40	47,5 ± 4,2
		20	M	1,68 ± 0,40	48,0 ± 4,2
F4	S	7	F	0,60 ± 0,10	36,6 ± 2,9
		10	M	0,60 ± 0,20*	39,4 ± 5,5*
	T	8	F	0,40 ± 0,20	30,5 ± 3,9
		10	M	0,40 ± 0,10	31,9 ± 2,4

S : lignée sélectionnée ; T : lignée témoin ; F3, F4 : générations 3 et 4. * : indique la présence de différences significatives entre lignée sélectionnée et témoin. Les valeurs sont indiquées en moyenne ± écart-type et n indique le nombre d'individus.

Échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué sur deux générations (F3 et F4) pour les deux lignées, sélectionnée et témoin. Pour des raisons liées aux élevages, les poissons des deux générations n'ont pu être échantillonnés au même âge, ni au même moment. L'échantillonnage des œufs a été réalisé durant la période de frai de l'année 2007 pour la génération 3 et durant celle de 2009 pour la génération 4. Le suivi des concentrations plasmatiques des stéroïdes sexuels a été réalisé au moyen de prises de sang effectuées par ponction caudale, une fois par mois, du mois de juillet 2008 au mois de novembre 2008 pour la génération 3 et du mois de mai 2009 jusqu'au mois de novembre 2009 pour la génération 4. Tous les prélèvements se sont déroulés entre 9:00 et 13:00 afin d'éviter des biais liés aux cycles circadiens des hormones circulantes. Pour tous les échantillonnages sur la F4, les géniteurs ont été sacrifiés pour prélèvement de tissus. Malheureusement nous n'avons pu le faire sur les géniteurs F3 ceux-ci étant en nombre plus restreint dans les élevages.

Les géniteurs, préalablement anesthésiés dans un bain de MS222 (0,18g L⁻¹), ont été pesés et mesurés (longueur à la fourche). Les ponctions au niveau de la caudale (1ml) ont été réalisées à l'aide de seringues stériles et héparinées (héparine d'ammonium). Le sang a été immédiatement centrifugé à 3500 g pendant 3 minutes, puis le plasma a été récupéré et conservé à -80°C jusqu'au moment des analyses.

Chez les animaux sacrifiés, le foie et les gonades ont été pesés et les indices hépatosomatique et gonadosomatique ont été calculés selon les formules suivantes :

$$IHS = 100 M_f M^{-1}$$

$$IGS = 100 M_g M^{-1}$$

(M = poids corporel (g) et L = longueur totale (cm), M_f = poids du foie (g), M_g = poids des gonades (g).

Le facteur de condition de Fulton a également été calculé :

$$K = (M L^{-3}) 100$$

Dosages

Afin de suivre la variation saisonnière du 17β-estradiol et de la testostérone chez les femelles, ces hormones ont été dosées au moyen de trousse radioimmunologiques (testostérone : # 07-189102 ; 17β-estradiol : # 07-138102 ; ImmuChem™ Double Antibody, ICN Biomedicals, Inc. Costa Mesa, CA, USA).

Les foies ont été homogénéisés dans un tampon phosphate 0.1M à pH 7.0, auquel avait été ajouté 50ul/ml d'un cocktail inhibiteur de protéase (Sigma-Aldrich) afin d'inhiber la dégradation de vitellogénine. Le produit obtenu a été placé dans des microtubes et congelés à -80°C jusqu'à l'analyse. Avant l'analyse, les homogénats ont été centrifugés à 8000 g pendant 10 minutes. Par la suite, la quantification des concentrations de vitellogénine a été réalisée sur le surnageant en utilisant un protocole immuno-chimique

(ELISA) (Biosense Laboratories AS, prod. no. V01004402) validé chez la Truite arc-en-ciel.

Qualité des œufs

Au moment du frai, les œufs ont été récoltés par pression sur les flancs des géniteurs (14 femelles sélectionnées, 19 femelles témoins pour la 3^{ème} génération ; 7 femelles sélectionnées, 8 femelles témoins pour la 4^{ème} génération). Le nombre total d'œufs extraits a été compté selon la méthode de Von Bayer (M.L.C.P.Q. 1983), l'indice de fécondité relative a été déterminé (nombre d'œufs kg^{-1} du poids corporel) et le diamètre de 10 œufs par femelles a été mesuré sous loupe binoculaire à l'aide d'un vernier à 0.1 mm près.

La fécondation artificielle a été faite à sec après extraction des œufs et du sperme. Les œufs fécondés ont été désinfectés, 3 heures après fécondation, avec une solution d'ovadine (titrée à 1% d'iode actif) et incubés dans des clayettes placées dans des auges afin d'avoir les mêmes conditions environnementales d'incubation pour chacune des familles obtenues. L'assignation des clayettes pour chacune des familles a été faite par tirage au sort. L'incubation des œufs a été faite en eau douce à l'abri de la lumière, à une température de 4° à 5°C en moyenne jusqu'à 100% d'éclosion, puis à 8°C jusqu'à l'alimentation exogène. Pendant l'incubation, les œufs morts de chacune des familles des deux lignées sélectionnée et témoin ont été retirés et comptés deux fois par semaine. À 100 degré jours, environ 20 œufs par femelle ont été prélevés dans les clayettes d'incubation en vue de déterminer le pourcentage de fécondation des œufs. Ils ont été mis dans une solution d'éclaircissement [Stockard (5 vol. de formol, 6 vol. de glycérol, 4 vol. d'acide acétique pour 85 vol. d'eau)] et après 24 heures, le pourcentage de fécondation a été déterminé sous loupe binoculaire.

Le nombre d'œufs et d'alevins ayant atteint l'éclosion et le début de l'alimentation exogène a pu ainsi être établi pour chacune des familles des deux lignées sélectionnée et témoin.

Qualité du sperme

Chez les mâles, le sperme a été récupéré par pression sur les flancs (18 mâles sélectionnés, 20 mâles témoins pour la 3^{ème} génération ; 10 mâles sélectionnés, 10 mâles témoins pour la 4^{ème} génération). Une partie du sperme a été extraite pour la fécondation des œufs. Le surplus a été récolté immédiatement et divisé en deux aliquotes. La première aliquote a servi pour la détermination de la concentration en spermatozoïdes. Le nombre de spermatozoïdes par ml de sperme a été calculé après dilution de 50µl de sperme frais dans du NaCl à 0,1% et comptage au Coulter Counter (Z2™ series). La seconde aliquote a été centrifugée à 500g pendant 10 minutes et le plasma séminal conservé à -80°C jusqu'au moment des analyses. L'osmolarité du plasma séminal a été mesurée à l'aide d'un osmomètre (The Advanced™ Micro-Osmometer Model 3MO). La concentration en glucose a été dosée par spectrophotométrie en utilisant une méthode enzymatique (QuantiChrom™ Glucose Assay Kit, BioAssay Systems, CA, USA).

Analyses statistiques

La normalité de la distribution des données a été vérifiée par le test de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$) (Sokal et Rohlf 1995). L'homogénéité des variances a été testée par le test de Brown-Forsythe ($\alpha=0,05$). Les concentrations d'œstradiol et de testostérone ont été transformées en $\log(x+1)$, les données sur le pourcentage de mortalité à 24h et le pourcentage de la survie à l'éclosion en $\arcsinus \sqrt{x}$ afin d'obtenir la normalité des données.

Les données de fécondité relative, de diamètre des œufs, de concentration en spermatozoïdes, d'osmolarité et de concentration du glucose dans le plasma séminal ainsi que les données de suivis familiaux ont été analysées à l'aide de tests de t de Student's pour chacune des générations (lignée sélectionnée vs lignée témoin), alors que les concentrations plasmatiques en stéroïdes sexuels, la concentration hépatique en vitellogénine dans le foie ainsi que les indices hépatosomatique et gonadosomatique ont été analysés pour chacune des générations à l'aide d'ANOVAs à deux critères de classification ($\alpha=0,05$), soit la lignée

et le mois d'échantillonnage suivis de tests a posteriori de Tukey pour échantillons inégaux, lorsque requis. Toutes les données ont été analysées avec le logiciel STATISTICA 6.0 de StatSoft©.

1.3 RÉSULTATS

Les indices gonadosomatique (IGS) et hépatosomatique (IHS)

Comme les géniteurs de la génération 3 n'ont pas été sacrifiés, l'indice gonadosomatique n'a été mesuré que chez les poissons de la 4^{ème} génération. Aucune différence en fonction de la lignée n'a été observée ($dl = 1$, $F = 0,29$ et $p > 0,05$) et les patrons saisonniers sont les mêmes pour les deux lignées (interaction lignée x mois, $dl = 4$, $F = 0,34$, $p > 0,05$) et, dans les deux cas, on peut noter le début d'une hausse significative en août, avec une augmentation plus notable en septembre (Figure 1.1 A).

De même, aucune différence significative n'est observée entre les deux lignées de la génération 4 ($dl = 1$, $F = 0,46$ et $p > 0,05$) pour l'indice hépatosomatique moyen. On observe encore une fois un patron saisonnier similaire pour les deux lignées (interaction lignée x mois, $dl = 5$, $F = 0,69$, $p > 0,05$) (Figure 1.1 B). L'indice hépatosomatique augmente graduellement tout au long de l'été, atteint sa valeur maximale en septembre pour diminuer de façon significative en novembre.

Fécondité relative et diamètre des oeufs

Des indices de fécondité relative similaires sont observés chez les deux lignées tant à la génération 3 qu'à la génération 4 ($p > 0,05$). À la génération 3, on obtient une fécondité relative moyenne de 1460 ± 260 et à la génération 4 de 1891 ± 383 œufs/kg (Tableau 1.2).

Le diamètre moyen des œufs est également similaire entre les deux lignées pour les deux générations (Tableau 1.2) ($p > 0,05$). À la génération 3, on obtient un diamètre moyen de 5.3 ± 0.2 et à la génération 4 de 4.8 ± 0.1 mm.

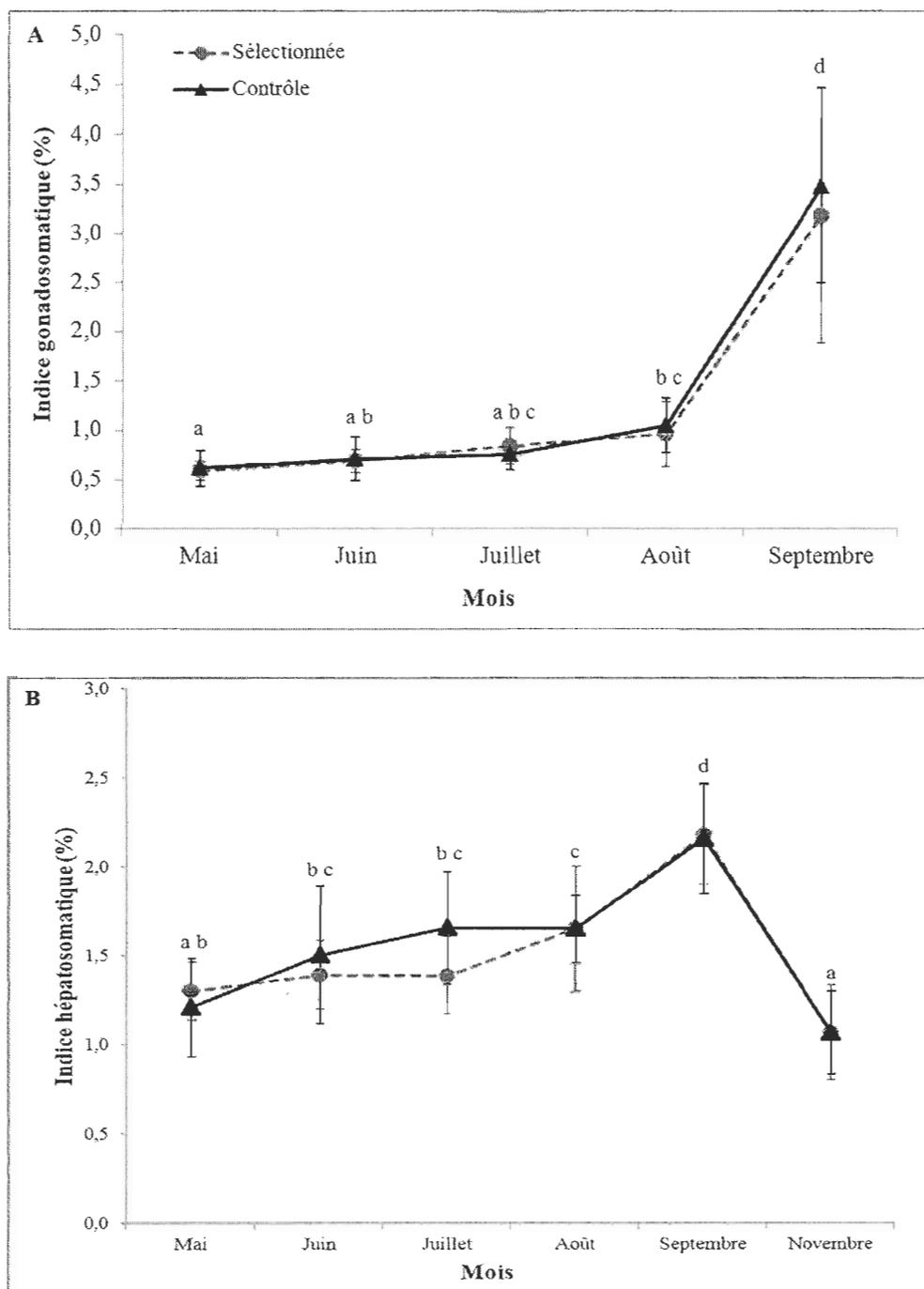


Figure 1.1. L'indice gonadosomatique (A) et l'indice hépatosomatique (B) chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la 4^{ème} génération. Comme il n'y a pas de différences significatives entre les lignées, les lettres indiquent la présence de différences significatives ($p < 0,05$) entre les mois.

Tableau 1.2. Fécondité relative et diamètre des œufs en fonction de la lignée et de la génération.

Génération	Lignée	n	Fécondité relative (œufs kg ⁻¹)	Diamètre moyen des œufs (mm)
F3	S	14	1504 ± 242	5.3 ± 0,2
	C	19	1416 ± 278	5.4 ± 0,2
F4	S	7	1834 ± 259	4.8 ± 0,1
	C	8	1948 ± 507	4.8 ± 0,2

S : lignée sélectionnée ; C : lignée témoin ; F3, F4 : générations 3 et 4. Les valeurs sont indiquées en moyenne ± écart-type et n indique le nombre d'individus.

Régulation endocrinienne de la reproduction et suivi des concentrations de vitellogénine

Testostérone plasmatique

L'analyse de variance à deux critères de classification (lignée et mois) effectuée pour les mois communs (de juillet 2008 à novembre 2008) pour la génération 3 indique des niveaux moyens de testostérone similaires entre les deux lignées (dl = 1, F = 2,02 ; p > 0,05). Chez celles-ci, la variation saisonnière est identique (interaction lignée x mois, dl = 4, F = 0,98 ; p > 0,05) (Figure 1.2 A) avec une concentration qui augmente en septembre et reste élevée jusqu'au moment du frai (novembre 2008).

À la génération 4, les résultats sont similaires à ceux obtenus à la génération 3, soit des concentrations moyennes de testostérone plasmatiques similaires entre les deux lignées (dl = 1, F = 0,99 ; p > 0,05). Cependant, dans ce cas-ci, le patron saisonnier diffère légèrement entre les deux lignées (interaction lignée x mois, dl = 5, F = 5,8 ; p < 0,05) avec des concentrations plus faibles en début de saison pour la lignée sélectionnée (Figure 1.2 B). Chez les deux lignées, comme à la génération 3, on observe des concentrations plus élevées en automne.

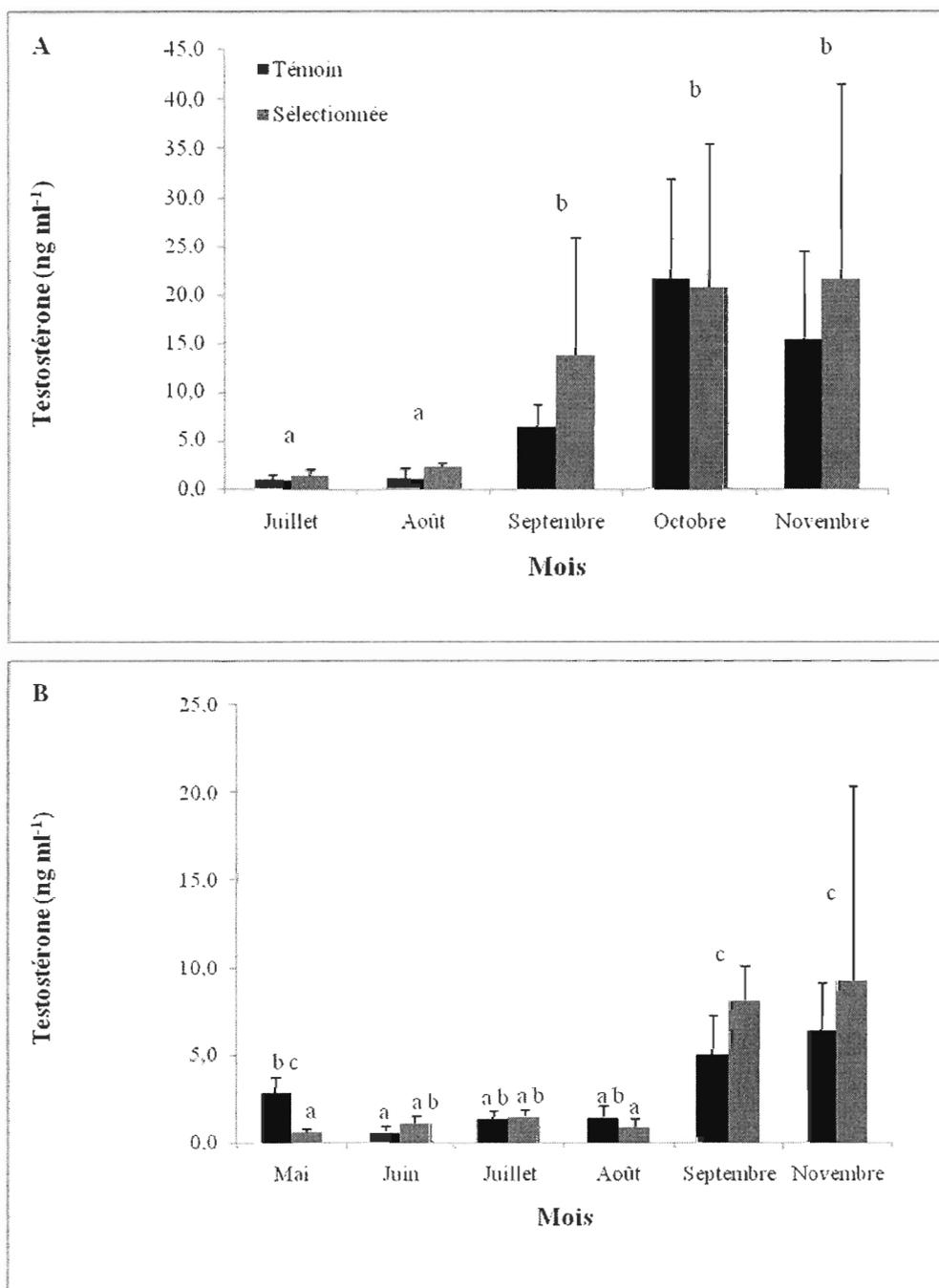


Figure 1.2. Concentrations mensuelles de la testostérone chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la 3^{ème} génération (A) et de la 4^{ème} (B) génération. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes mensuelles obtenues.

17 β -estradiol plasmatique

Tout comme pour la testostérone plasmatique, les concentrations plasmatiques de 17 β -estradiol sont similaires entre les deux lignées à la 3^{ème} génération (dl = 1, F = 1,65, p > 0,05) et le patron saisonnier est similaire (interaction lignée x mois, dl = 3, F = 3,02 ; p > 0,05), les concentrations les plus élevées étant observées en octobre et novembre. (Figure 1.3 A). Le même patron saisonnier général est observé pour les deux lignées à la 4^{ème} génération, avec des niveaux moyens similaires entre les deux lignées (dl = 1, F = 10,2, p > 0,05 ; interaction lignée x mois, dl = 3, F = 2,21 ; p > 0,05). Pour cette génération, la baisse de 17 β -estradiol plasmatique au moment du frai (novembre) est significative.

À la génération 4, nous avons observé des différences significatives entre la lignée sélectionnée et témoin en ce qui concerne les concentrations de vitellogénine hépatique (dl = 1, F = 4,7 et p < 0,05). L'interaction est significative entre les deux critères de classification (dl = 5, F = 2,5 et p < 0,05) (Figure 1.4) et, bien que les deux patrons saisonniers se ressemblent, on peut distinguer une hausse plus graduelle de la vitellogénine hépatique chez la lignée sélectionnée avec une concentration qui commence à augmenter en juillet, et une hausse plus intense en septembre chez la lignée témoin.

Qualité du sperme

Chez les mâles la sélection n'a pas eu d'effet sur la concentration moyenne de spermatozoïdes dans la laitance (p > 0,05), mais le diamètre des spermatozoïdes était plus petit chez la lignée sélectionnée à la génération 4 (Tableau 1.3). Aucune différence entre les deux lignées n'a été détectée au niveau de la qualité du plasma séminal (osmolarité, concentration en glucose), ni au niveau du pourcentage de fécondation et ce, pour les deux générations (Tableau 1.3). À 100 degrés-jours, environ 20 œufs par famille ont été prélevés dans les clayettes d'incubation, en vue de déterminer le pourcentage de fécondation des œufs. Ce pourcentage était non significativement différent entre les deux lignées tant à la génération 3 qu'à la génération 4 (p > 0,05) (Tableau 1.3).

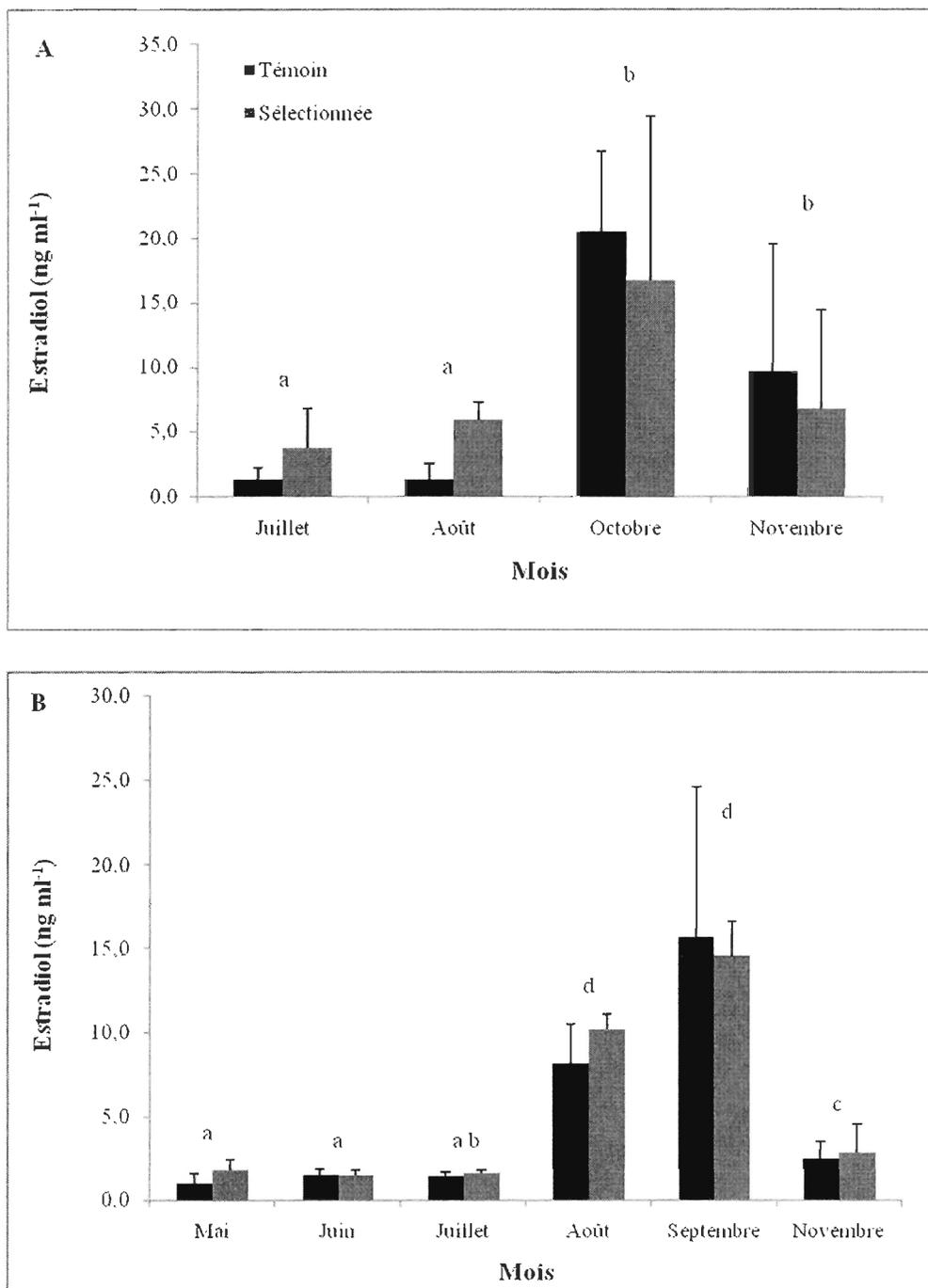


Figure 1.3. Concentrations mensuelles de l'estradiol chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la 3^{ème} génération (A) et de la 4^{ème} (B) génération. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. Des lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les moyennes mensuelles.

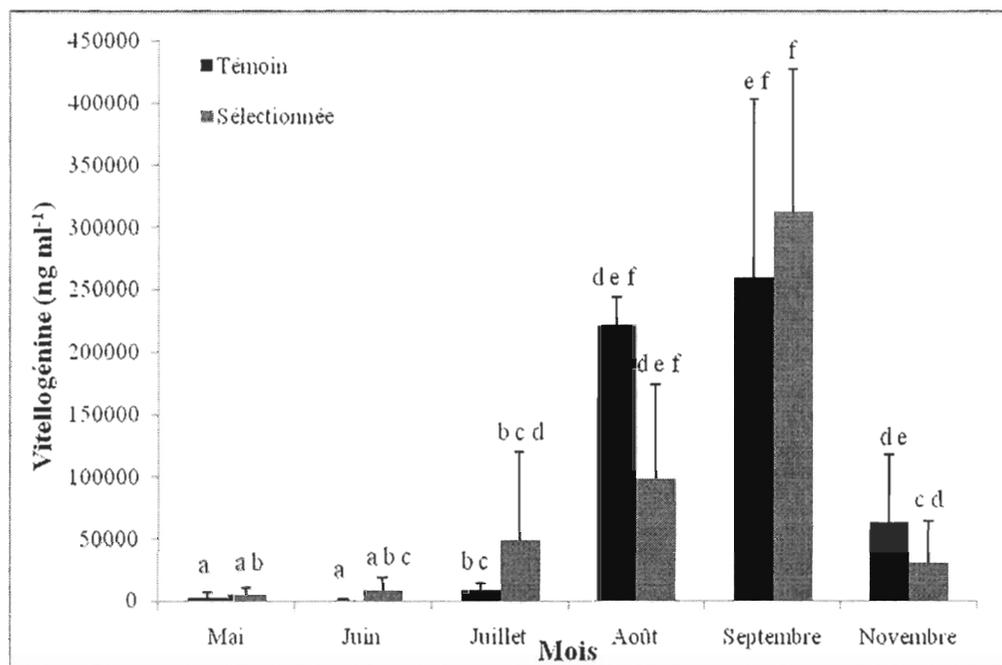


Figure 1.4. Concentrations mensuelles de la vitellogénine hépatique chez les femelles des deux lignées (sélectionnée et témoin) de la génération 4. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. Des lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les moyennes mensuelles pour chacune des deux lignées.

Tableau 1.3. Concentration en spermatozoïdes du sperme, diamètre des spermatozoïdes, osmolarité et concentration en glucose du plasma séminal ainsi que le pourcentage de fécondation en fonction de la lignée et de la génération.

Génération Lignée n	Mâles			
	F3		F4	
	S 18	T 20	S 10	T 10
Concentration SPZ($\times 10^9$)/ml	10,20 \pm 3,9	7,80 \pm 3,2	10,80 \pm 2,60	8,31 \pm 3,12
Diamètre SPZ (μm)	2,84 \pm 0,16	2,80 \pm 0,07	2,87 \pm 0,02*	2,99 \pm 0,02
Osmolarité (Mosm/kg)	227,50 \pm 62,0	189,80 \pm 55,2	276,1 \pm 26,9	241,20 \pm 58,3
Glucose (mmol/L)	0,39 \pm 0,70	0,28 \pm 0,21	0,57 \pm 0,72	0,44 \pm 0,25
Fécondation (%)	70,30 \pm 18,29	61,70 \pm 23,9	90,0 \pm 10,0	90,00 \pm 14,1

S : lignée sélectionnée ; T : lignée témoin ; F3, F4 : générations 3 et 4. Les valeurs sont indiquées en moyenne \pm écart-type, * indique des différences significatives à $p < 0,05$ entre les lignées pour une génération donnée et n indique le nombre d'individus. SPZ : spermatozoïdes.

Suivis familiaux

La mortalité 24 heures après fécondation était similaire entre les deux lignées et ce, pour les deux générations. Pour la génération 3, le pourcentage moyen était de $9,4 \pm 6,3$ et pour la génération 4 de $5,2 \pm 3,8$ %. Également, aucune différence au niveau de la survie à l'éclosion (pourcentage moyen à la F3 : $60,1 \pm 21,3$ %; pourcentage moyen à la F4 : $80,5 \pm 11,2$ %) n'a été observée. Cependant, on remarque que la longueur des alevins sélectionnés à l'alimentation exogène est supérieure à celle des alevins témoins, conséquence du programme de sélection, alors que les autres paramètres tel que le volume du sac vitellin et masse des alevins à l'alimentation exogène ne présentent aucune différence entre les deux lignées de la génération 3 (Tableau 1.4). Étant donné qu'aucune différence n'a été trouvée pour la F3, ce suivi n'a pas été fait pour la F4, étant donné la somme de travail demandée.

Tableau 1.4. Suivi familial des jeunes stades pour les deux lignées (sélectionnée et témoin) et pour les deux générations.

Génération Lignée n	Suivi Familial			
	F3		F4	
	S 20	T 20	S 20	T 20
Mortalité 24h après fécondation	13,4 ± 5,6	11,3 ± 7,0	5,4 ± 4,1	5,0 ± 3,6
VSV (mm³)	100,3 ± 13,2	101,5 ± 11,0	-	-
LAE (mm)	18,67 ± 0,34	18,43 ± 0,72	-	-
Survie à l'éclosion (%)	57,9 ± 22,9	62,30 ± 20,3	78,8 ± 12,4	82,2 ± 10,1
LAA (mm)	25,74 ± 0,55*	24,73 ± 0,88	-	-
Masse alevin alimentation (g)	0,11 ± 0,02	0,09 ± 0,01	-	-

S : lignée sélectionnée ; T : lignée témoin ; VSV : Volume du sac vitellin ; LAE : longueur des alevins à l'éclosion, LAA : Longueur des alevins au stade d'alimentation exogène. * indique des différences significatives à $p < 0,05$ entre les lignées pour une génération donnée. Moyenne ± écart-type et n indique le nombre d'individus.

1.4 DISCUSSION

Au cours de notre étude, la sélection n'a eu aucun effet significatif sur le succès reproducteur. Nous n'avons pas observé de différence de fécondité entre les femelles sélectionnées et les femelles témoins, pour les deux générations. En élevage, Springate et Bromage (1985) et Srivastava et Brown (1991) ont démontré que la production d'œufs chez les Salmonidés est directement liée à l'alimentation, au poids corporel et à l'âge des géniteurs. En effet, l'augmentation du poids corporel des femelles pendant la période de reproduction peut entraîner une réduction de la fécondité relative chez l'Omble chevalier (Gillet 1995) chez qui les femelles plus âgées, donc plus grosses, présentent une fécondité relative moins élevée que celle des femelles plus jeunes. La taille de l'œuf est un critère morphologique important, puisqu'elle a été associée à la taille des alevins et à leur survie. Chez l'Omble de fontaine, la masse de la femelle est fortement corrélée avec la taille de l'embryon, du sac vitellin et la longueur de l'alevin (Perry et al. 2004). Selon ces auteurs, les alevins issus de plus gros œufs ont une croissance plus rapide et affichent des pourcentages de survie largement supérieurs à ceux des alevins issus de petits œufs. Dans notre étude, comme pour la fécondité relative, la taille des œufs n'a pas été affectée par la sélection combinée, le diamètre des œufs étant identique entre les lignées pour les deux générations. Cependant, les œufs des femelles de génération 3 étaient plus gros que ceux des femelles de génération 4, sans doute à cause de facteurs d'âge et de poids. Les femelles F3 (plus grosses) ont eu moins d'œufs que les femelles F4 (fécondité relative plus faible), alors que les œufs des femelles F4 étaient plus petits que ceux des femelles F3.

Nos résultats de fécondité relative sont identiques à ceux obtenus par Bascinar et Okumus (2004) chez des femelles d'Omble de fontaine du même âge que celles de la F3. Le diamètre moyen des œufs de nos femelles est aussi identique aux résultats obtenus par Bascinar et Okumus (2004).

Les patrons saisonniers des stéroïdes sexuels tels que mesurés dans notre étude sont similaires aux résultats attendus. Ainsi, durant la phase du repos sexuel et le début de la vitellogenèse, les concentrations en stéroïdes sexuels restent peu élevées (Perche commune Sulistyo et al. 1998 ; Noaksson et al. 2004 ; Poisson crapaud (*Halobatrachus didactylus*) Modesto et Canário 2003). Au printemps et au début de l'été, elles augmentent, puis restent élevées lors de la phase de vitellogenèse (fin août à la fin octobre) avant de chuter lors de la maturation finale et de l'ovulation (novembre) (Perche, Dabrowski et al. 2002; Poisson chat, Mishra et Joy 2006). Cette diminution brutale est particulièrement notable chez les Poissons à ponte annuelle unique comme l'Ombre de fontaine (Rinchart et al. 1998). Goetz et al. (1987) ont observé chez l'Ombre de fontaine que les concentrations du 17 β -estradiol restaient élevées jusqu'à la rupture de la vésicule germinale, ce qui suggère que la baisse des concentrations est intimement liée à la maturation finale. Au cours de la phase finale de la maturation, la diminution des niveaux de 17 β -estradiol pourrait stimuler l'augmentation rapide des niveaux de gonadotropines, et en conséquence, la maturation des ovocytes et l'ovulation, comme le suggèrent Whitehead et al. (1983). Jackson et Sullivan (1995) ont cependant obtenu des variations moins marquées chez la Perche blanche (*Morone americana*), avec une légère augmentation de 17 β -estradiol en début de vitellogenèse suivie d'une diminution progressive jusqu'au début de la saison de ponte. D'après Matsuyama et al. (2005) les concentrations en testostérone augmentent parallèlement à celles de la 17 β -estradiol chez le Maquereau (*Scomber japonicus*). Chez l'Ombre chevalier la testostérone augmente parallèlement avec le 17 β -estradiol, mais les concentrations les plus élevées sont atteintes 1-2 mois après la hausse maximale de 17 β -estradiol (Frantzen et al. 1997).

Chez les Téléostéens, le foie produit la vitellogénine, principale protéine du vitellus (Patiño et Sullivan 2002 ; Jalabert 2005). Elle est emmagasinée par les cellules folliculaires puis transférée à l'ovocyte. Higashino et al. (2002) réfutent ce rôle trophique chez *Verasper moseri* et d'après eux, la vitellogénine pénètre directement dans l'ovocyte. Concernant l'indice gonado-somatique, aucune différence n'a été notée entre les deux lignées de la F4. Selon Crandell et Gall (1993), l'influence de la croissance sur la maturation des gonades

devrait se refléter dans les indices gonado-somatiques ou dans l'incidence de la maturation chez les animaux issus de la sélection chez la Truite arc-en-ciel.

Chez les mâles, le nombre et le diamètre des spermatozoïdes ont servi comme indicateurs de la qualité du sperme. Malgré la différence d'âge entre les deux générations, aucune différence n'a été observée au niveau de la concentration en spermatozoïdes entre les générations 3 et 4, ni entre les lignées. Le compte des spermatozoïdes et leur diamètre correspondent bien avec les résultats rapportés chez les Salmonidés par Scott et Baynes (1980) et Piironen et Hyvarinen (1983), soit une concentration en spermatozoïdes de $10 \times 10^9 \text{ ml}^{-1}$ et un diamètre d'environ $2.4 \mu\text{m}$. Ces caractéristiques peuvent affecter le pourcentage de fécondation; en effet, un nombre élevé de spermatozoïdes de faibles diamètres pourrait créer de la polyspermie, les spermatozoïdes de plus petit diamètre que le micropyle de l'œuf entrant en compétition devant ce dernier. Le pourcentage de fécondation des œufs est souvent utilisé lui aussi comme indicateur de la qualité du sperme et cet indicateur a été proposé comme un outil de gestion permettant de prédire les performances futures des œufs et des alevins chez la truite arc-en-ciel (Springate et al. 1984). Le pourcentage de fécondation a augmenté de la F3 à la F4, mais est demeuré le même entre les deux lignées.

Le succès reproducteur tel que nous l'avons défini prend en compte non seulement l'indice de fécondité, mais également la viabilité des œufs, 24h après fécondation et à différents stades de développement (oeillé et éclosion). La mortalité 24h après fécondation rend compte à la fois de l'état de maturation des œufs à l'ovulation, du succès de fécondation des œufs et de leur fragilité, suite aux différentes manipulations liées à la fécondation et à l'incubation (Atse et al. 2002). Dans notre étude, la sélection n'a eu aucun impact sur la mortalité des œufs 24h après fécondation. Des mesures telles que le volume du sac vitellin, la longueur des alevins à l'éclosion et la masse des alevins à la première alimentation ont été effectuées sur la progéniture de la 3ème génération. Cependant aucune différence n'a été observée entre les deux lignées sauf pour la longueur des alevins à la première alimentation. Ce dernier résultat est fort probablement lié au programme de

sélection. Le succès à l'éclosion des œufs est un indicateur important de leur qualité (Atse et al. 2002) et peut être influencé par la température d'incubation (Bebak et al. 2000) ou d'élevage des géniteurs d'Ombre chevalier (Gillet 1991). Les œufs ont été gardés sous des conditions environnementales similaires et le succès à l'éclosion était identique entre les deux lignées et pour les deux générations.

En conclusion, notre étude apporte une première réponse sur les effets indirects que peut avoir une sélection pour la croissance et l'élimination de la maturité sexuelle précoce sur le succès reproducteur. Nos résultats montrent clairement que la sélection directe pour une croissance accrue et l'absence de la maturité sexuelle précoce n'a pas engendré d'effet indirect sur le succès reproducteur, tel qu'attendu. Les résultats obtenus dans la présente étude laissent envisager un avenir prometteur à ce type de programme de sélection relativement simple à appliquer. À noter qu'il serait intéressant d'étudier la corrélation génétique entre l'ensemble des traits d'intérêt chez cette espèce.

**CHAPITRE 2. EFFET DU MILIEU D'ÉLEVAGE SUR LE SUCCÈS
REPRODUCTEUR CHEZ L'OMBLE DE FONTAINE (*SALVELINUS
FONTINALIS*)**

2.1 INTRODUCTION

La réponse aux variations thermiques fait partie du processus normal de régulation de la reproduction chez les Salmonidés et d'autres espèces de poissons des zones tempérées, alors que l'augmentation de la température à des niveaux élevés peut avoir des effets néfastes sur la reproduction de plusieurs espèces (e.g. Van Der Kraak et Pankhurst 1997). Chez les poissons d'élevage, la température peut avoir un impact majeur sur la qualité des œufs, la maturation des gamètes, l'ovulation et la ponte (e.g. Bromage et al. 2001). Ainsi, chez le Flétan de l'Atlantique (*Hippoglossus hippoglossus*), Brown et al. (1995) ont relié la qualité des gamètes aux conditions thermiques d'élevage des géniteurs. L'exposition de géniteurs d'Omble chevalier à un stress thermique peut affecter non seulement la reproduction, mais également la survie des œufs et des alevins. Chez les Salmonidés, des températures soit trop basses, soit trop élevées peuvent avoir un impact négatif sur la qualité des œufs (Gillet 1994). Ainsi, le transfert de géniteurs de Saumon atlantique d'une température de 16°C à une température de 8°C entraîne la reprise de la maturation et de l'ovulation, mais avec un faible pourcentage d'éclosion (King et Pankhurst 2000; Watts et al. 2004). Des effets similaires de l'arrêt et de la reprise de l'ovulation ont été observés chez les femelles d'Omble chevalier, mais sur une plage de température inférieure (entre 5 et 11°C) (Gillet 1991). Chez d'autres Téléostéens, comme le Loup, les femelles montrent un retard dans la progression de l'ovulation et une réduction de la fertilité des œufs ainsi que de leur survie à 12°C (Tveiten et al. 2001). Chez l'Omble de fontaine, une inhibition de l'ovulation a été observée à une température de 16°C (Hokanson et al. 1973).

La réponse aux stimuli environnementaux est régulée par les systèmes nerveux et endocriniens. Comme l'axe hypothalamo-hypophysaire joue un rôle majeur dans la régulation du cycle reproducteur, on peut s'attendre à y déceler les premiers effets des conditions thermiques en lien avec la reproduction. Tveiten (2008) a ainsi montré que la

synthèse et la sécrétion des stéroïdes sexuels sont influencées par les conditions thermiques en cours de croissance de l'ovaire, en période de frai, et à l'ovulation chez la Morue de l'Atlantique (*Gadus morhua*).

L'exposition des poissons à une température de 12°C pendant la période de frai entraîne une concentration plasmatique réduite du 17 β -estradiol, en comparaison avec ceux maintenus à 4°C et 8°C. Chez des Saumon atlantique maintenus à 4°C, la hausse saisonnière des concentrations de 17 β -estradiol plasmatiques est retardée de quatre semaines en comparaison avec des géniteurs maintenus à 8°C et 12°C avec modification subséquente de la période d'ovulation et de ponte (King et al. 2003).

Chez les mâles, la température semble également influencer la qualité du sperme. La température et le pH de l'eau jouent un rôle clé dans la concentration en spermatozoïdes et sur leur motilité. Les températures basses peuvent prolonger l'activité des spermatozoïdes, mais réduisent leur vitesse de la nage (e.g. Alavi et Cosson 2005).

L'objectif de la présente étude est de vérifier l'effet du milieu d'élevage sur le succès reproducteur de deux générations d'Ombre de fontaine. Le premier milieu d'élevage est caractérisé par des températures suivant des variations saisonnières normales (2 à 15°C) [Pointe-au-Père] et l'autre par une température constante (puits artésien 6°C) [Aquaculture Forestville]. Chez les femelles, l'effet du milieu d'élevage a été vérifié en comparant la fécondité relative et le diamètre des oeufs. Chez les mâles, nous avons examiné la concentration des spermatozoïdes dans la laitance, leur diamètre ainsi que l'osmolarité et la concentration en glucose du plasma séminal.

2.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Élevage de géniteurs

Les expériences ont été menées en 2007, 2008 et 2009, à la station aquicole de Pointe-au-Père (UQAR-ISMER) et à Aquaculture Forestville, avec des géniteurs d'Omble de fontaine issus de la souche anadrome de la rivière Laval (Tableau 2.1).

Les poissons ont été élevés sous une photopériode naturelle et un régime thermique différent selon le milieu d'élevage : température variable avec une variation saisonnière (2°C à 15°C) à la station aquicole de Pointe-au-Père et température constante (6°C, puits artésien) à Aquaculture Forestville (Figure 2.1). Les poissons maintenus à température variable ont été transférés en eau de mer du mois de juin au mois de septembre. Aux deux sites d'élevage, les poissons étaient maintenus dans des bassins de 1500 litres. Toutefois, les densités d'élevage au site privé ne sont pas connues.

Tableau 2.1. Caractéristiques morphologiques des géniteurs au moment du frai en fonction du lieu d'élevage et de la génération.

Génération	Lieu	n	Sexe	Masse (kg)	Longueur (cm)
F3	TV	20	F	1,85 ± 0,40*	47,50 ± 2,30*
		20	M	1,68 ± 0,40*	48,00 ± 4,20*
	TC	21	F	0,69 ± 0,29	36,70 ± 4,32
		20	M	0,75 ± 0,15	37,03 ± 2,11
F4	TV	8	F	0,35 ± 0,17	30,46 ± 0,17
		10	M	0,36 ± 0,09	31,90 ± 3,90
	TC	10	F	0,42 ± 0,12	27,25 ± 3,00
		10	M	0,43 ± 0,12	31,90 ± 2,42

TV : Température variable (Pointe-au-Père), TC : Température constante (Forestville)
 F3, F4 : générations 3 et 4. * : Indique la présence de différences significatives entre les géniteurs des deux milieux d'élevage. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type et n indique le nombre d'individus utilisés pour les comparaisons.

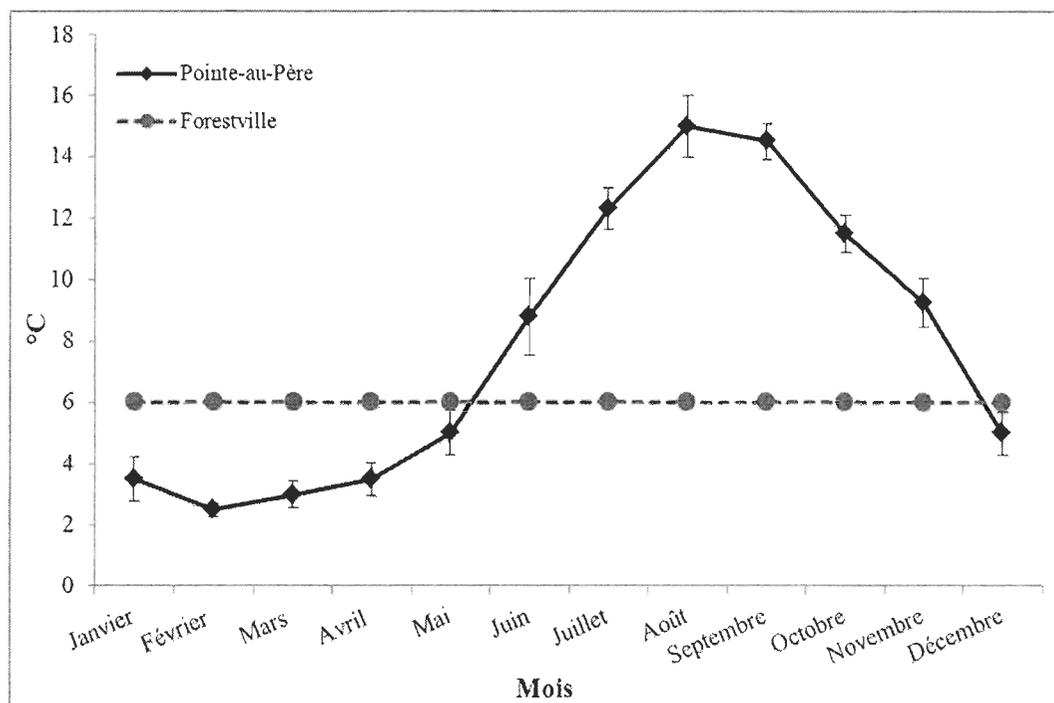


Figure 2.1. Variations annuelles de la température de l'eau douce aux deux lieux d'élevage (Pointe-au-Père, Forestville), durant l'année 2008 – 2009. Pour Pointe-au-Père, les moyennes mensuelles ont été obtenues à partir de mesures effectuées sur une base journalière. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type.

Échantillonnage

Les prises de sang ont été réalisées du mois de juillet 2008 au mois de novembre 2008 pour la F3 et du mois de mai 2009 jusqu'au mois de novembre 2009 pour la F4. Tous les prélèvements se sont déroulés entre 9:00 et 13:00 afin d'éviter les biais liés aux cycles circadiens des hormones circulantes. L'échantillonnage des œufs a été effectué au mois de novembre 2007 pour la F3 et au mois de novembre 2009 pour la F4.

Les géniteurs, préalablement anesthésiés dans un bain de MS222 ($0,18\text{g L}^{-1}$), ont été pesés et mesurés (longueur à la fourche). Des ponctions au niveau de la caudale ont été effectuées à l'aide de seringues stériles et héparinées (héparine d'ammonium). Le volume de sang prélevé (jusqu'à 1ml) était étroitement lié à la taille de l'individu échantillonné. À Aquaculture Forestville, des prises de sang non létales (de 0.1 à 0.5ml par individu) ont été faites afin de préserver le cheptel du producteur. Le sang a été centrifugé à 3500 g pendant 3 minutes, le plasma extrait puis conservé à -80°C , jusqu'au moment des analyses.

Le nombre total d'œufs extraits a été compté selon la méthode de Von Bayer (M.L.C.P.Q. 1983), l'indice de fécondité relative (nombre d'œufs kg^{-1} de masse corporelle), et le diamètre des œufs ont été mesurés (10 œufs par femelles). Chez les mâles, le nombre de spermatozoïdes par ml de sperme a été calculé après une dilution de 50 μl de sperme frais dans du NaCl à 0,1%, puis 10 μl de ce mélange ont été dilués dans du NaCl à 0,1% et trois comptages ont été effectués à l'aide d'un Coulter Counter (Z2™ series). Une partie du sperme a été centrifugée à 500g pendant 10 minutes et le plasma séminal a été conservé à -80°C jusqu'au moment des analyses. L'osmolarité du plasma séminal a été mesurée à l'aide d'un osmomètre (The Advanced™ Micro-Osmometer Model 3MO) alors que la concentration en glucose a été dosée par spectrophotométrie en utilisant la O-toluidine (Sigma).

Le suivi du patron saisonnier des stéroïdes sexuels (testostérone et 17β -estradiol) a été réalisé après dosage des stéroïdes sexuels au moyen de troupes radioimmunologiques

(testostérone : # 07-189102 ; 17 β -estradiol : # 07-138102 ; ImmuChem™ Double Antibody, ICN Biomedicals, Inc. Costa Mesa, CA, USA).

Analyse statistique

La normalité de la distribution des données a été vérifiée par le test de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$) (Sokal et Rohlf 1995). L'homogénéité des variances a été testée par le test de Brown-Forsythe ($\alpha=0,05$). Les données des concentrations des deux stéroïdes sexuels ont été transformées en $\log(x+1)$ afin d'obtenir la normalité des données.

Les données de fécondité relative, diamètre des œufs, concentration en spermatozoïdes, osmolarité et concentration du glucose ont été comparées entre les géniteurs issus des deux milieux d'élevage avec un test t de Student, tandis que les concentrations plasmatiques des stéroïdes sexuels ont été analysées avec une ANOVA à deux critères de classification ($\alpha=0,05$), soit le lieu d'élevage et le mois d'échantillonnage. Les ANOVAs ont été suivies d'un test a posteriori HSD de Tukey pour échantillons inégaux lorsque des effets significatifs étaient présents. Toutes les données ont été analysées avec le logiciel STATISTICA 6.0 de StatSoft©.

2.3 RESULTATS

Pour la F3, la période de frai fut le même aux deux milieux d'élevage. Par contre, pour la F4, les géniteurs maintenus à température variable ont frayé au mois de novembre alors les géniteurs maintenus à température constante ont frayé en janvier.

Fécondité relative et diamètre des œufs

Le milieu d'élevage influence la fécondité relative. En effet, la fécondité relative est plus grande chez les femelles F3 maintenues au milieu d'élevage à température constante comparativement à celle des femelles maintenues au milieu d'élevage à température variable ($p < 0,05$). Un résultat similaire est observé à la F4 où la fécondité relative reste plus élevée à température constante (Tableau 2.2). Le diamètre moyen des œufs est lui aussi différent entre les deux lieux d'élevage ($p < 0,05$) avec un diamètre plus grand chez les femelles maintenues à température variable et ce pour les deux générations. Cependant, le diamètre des œufs était plus petit chez les femelles F4 que chez les femelles F3 (Tableau 2.2).

Tableau 2.2. Fécondité relative et diamètre des œufs des femelles en fonction du lieu d'élevage et de la génération.

Génération	Lieu	n	Fécondité relative (œufs kg ⁻¹)	Diamètre moyen des œufs (mm)
F3	TV	19	1416 ± 278*	5,43 ± 0,17*
	TC	21	2096 ± 560	4,38 ± 0,18
F4	TV	8	1948 ± 507*	4,78 ± 0,22*
	TC	10	2379 ± 687	3,99 ± 0,54

TV : Température variable (Pointe-au-Père) ; TC : Température constante (Forestville) ; F3 et F4 : générations 3 et 4. Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type et n indique le nombre d'individus. * : indique la présence de différences significatives entre les géniteurs des deux milieux d'élevage. 10 œufs par femelles ont servi pour calculer le diamètre moyen des œufs.

Séroïdes sexuels

Testostérone plasmatique

L'analyse de variance à deux critères de classification (provenance et mois) effectuée pour les mois communs (de juillet 2008 à novembre 2008) pour la F3 indique des niveaux différents de testostérone entre les poissons des deux lieux d'élevage, plus élevées pendant la période de frai, chez les femelles maintenues à température variable (dl = 1; F = 8,32 ; p < 0,01), mais aussi des patrons saisonniers différents (interaction provenance x mois, dl = 3; F = 4,42 ; p < 0,01) (Figure 2.2 A). Les concentrations augmentent au mois de septembre et commencent à diminuer à partir du mois de novembre pour les deux lots.

Pour les femelles F4, les concentrations moyennes de testostérone plasmatiques sont globalement plus élevées chez les femelles maintenues à température constante (dl = 1; F = 0,99 ; p < 0,001) et les patrons saisonniers diffèrent significativement entre les deux lignées (interaction provenance x mois : dl = 2; F = 5,8 ; p < 0,001) avec des concentrations plus faibles en début de saison pour les poissons maintenus à température variable (Figure 2.3 A).

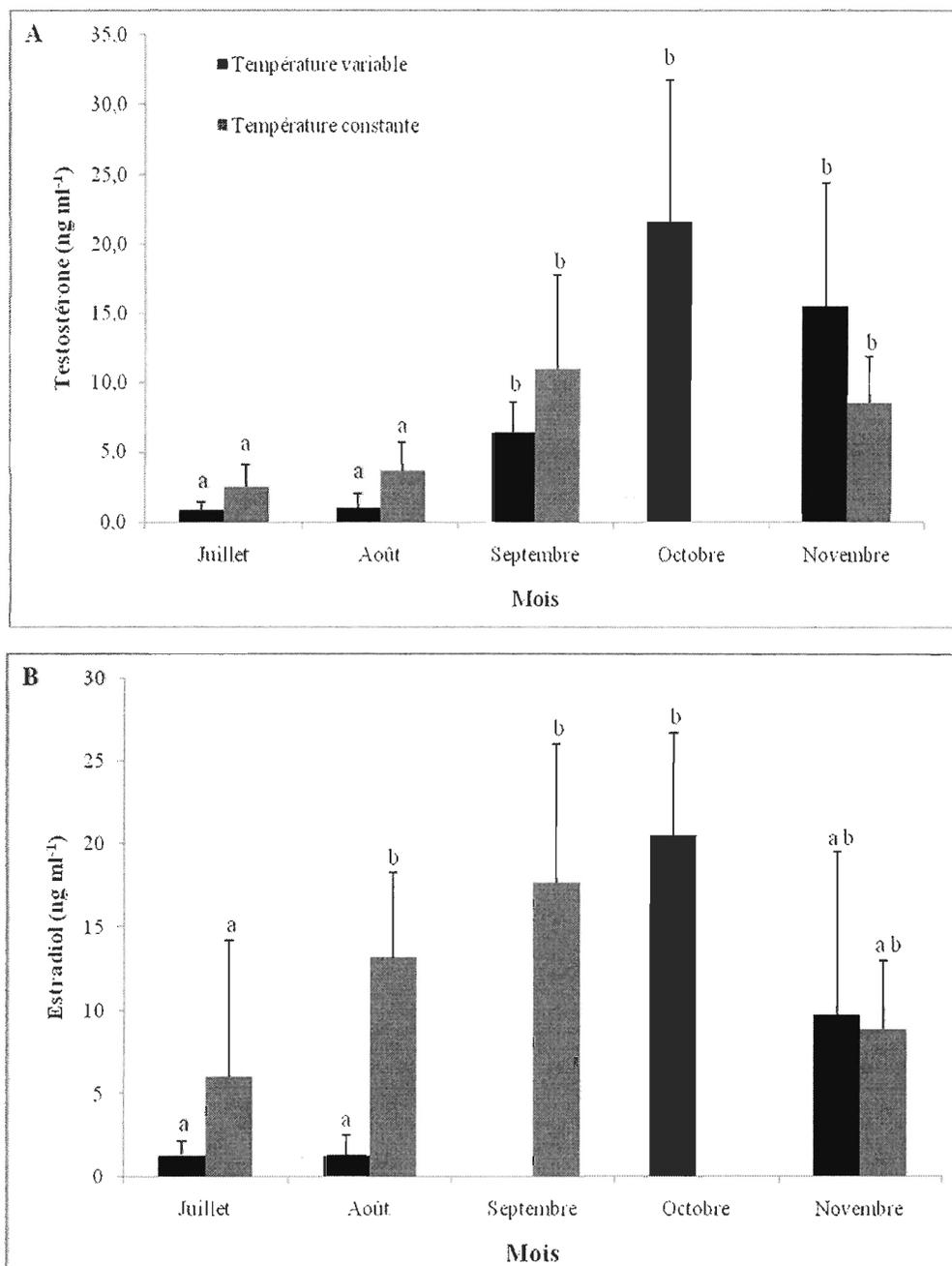


Figure 2.2. Concentrations mensuelles de la testostérone (A) et du 17 β -estradiol (B) chez les femelles F3 maintenues dans deux milieux d'élevage différents. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes mensuelles pour un milieu d'élevage donné. n= 4 femelles à température variable, n= 8 femelles à température constante.

À cause du décalage de la période de frai, il n'y a pas eu d'échantillonnage en octobre pour les femelles F3 maintenues à température constante mais, les femelles F4 ont été échantillonnées en janvier.

17 β -estradiol plasmatique

À la F3, les concentrations plasmatiques de 17 β -estradiol sont également différentes entre les poissons des deux milieux d'élevage de la F3 (dl = 1 ; F = 14,6 ; p < 0,001) et le patron saisonnier est également différent (interaction provenance x mois : dl = 2 ; F = 5,16 ; p < 0,05). Les concentrations de 17 β -estradiol sont restées faibles chez les femelles maintenues dans le milieu d'élevage à température variable pour le mois de juillet et août par rapport aux femelles maintenues au milieu d'élevage à température constante, alors qu'elles étaient plus élevées au mois d'octobre et avoisinant celles des femelles maintenues au milieu d'élevage à température constante au moment du frai (novembre) (Figure 2.2 B).

Contrairement à la F3, les concentrations plasmatiques de la 17 β -estradiol étaient similaires entre les deux groupes de la F4 pour les mois communs (juillet, août, septembre) (dl = 1 ; F = 0,98 ; p > 0,05 ; interaction provenance x mois dl = 2 ; F = 1,68 ; p > 0,05). Cependant, comme des échantillonnages ont également été faits en novembre (température variable) et janvier (température constante) et que l'effet mois était significatif dans l'analyse à 2 facteurs (dl = 2 ; F = 12,86 ; p < 0,001), la figure 2.3.B présente indépendamment les effets mensuels pour les deux milieux d'élevage. Les concentrations chez les femelles maintenues à température variable sont toutefois similaires à celles des femelles maintenues à température constante (Figure 2.3 B).

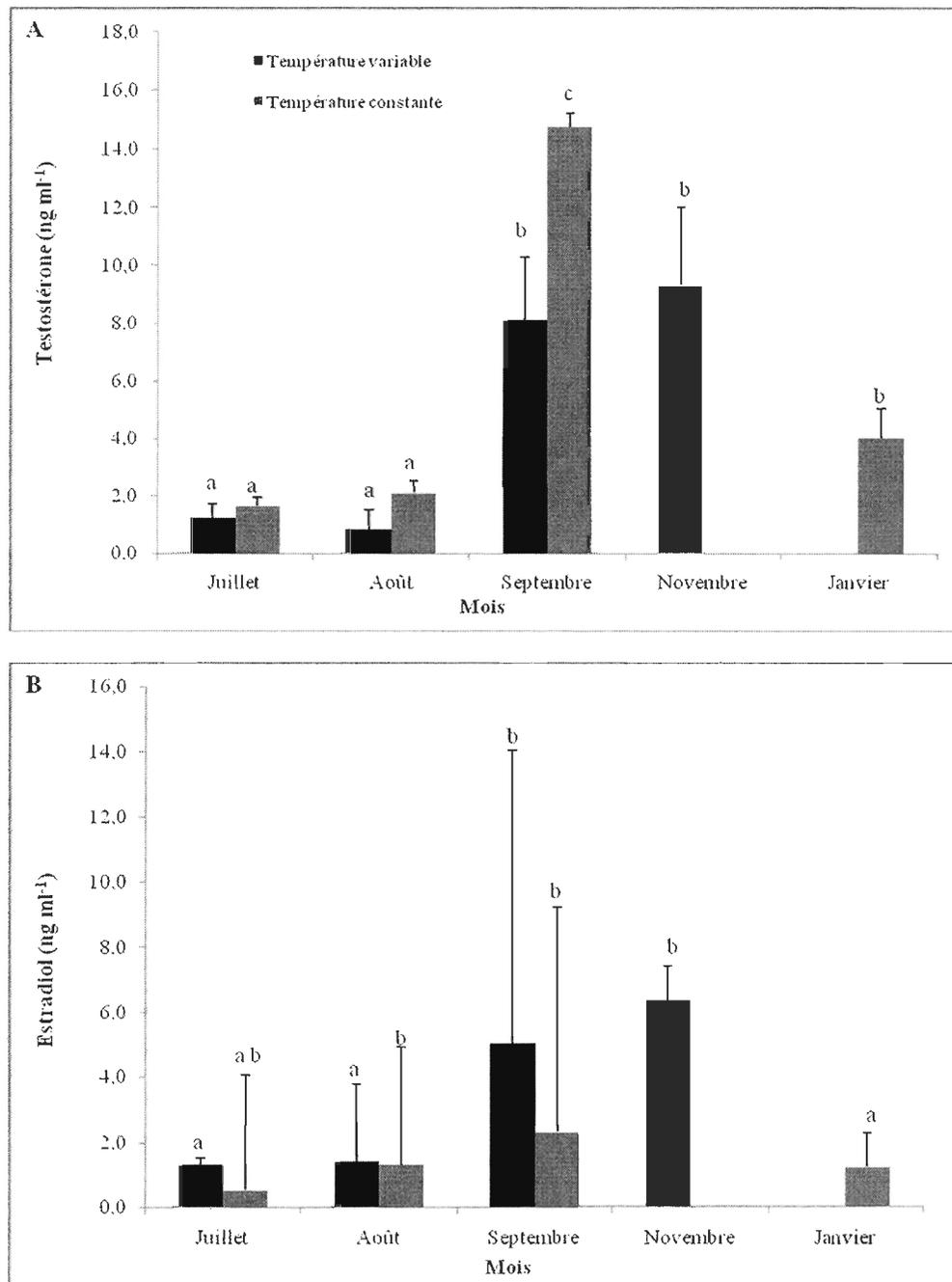


Figure 2.3. Concentrations mensuelles de la testostérone (A) et du 17 β -estradiol (B) chez les femelles F4 élevées aux deux sites d'élevage. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les moyennes mensuelles obtenues pour un milieu d'élevage donné. n= 8 femelles à température variable, n= 10 femelles à température constante.

Qualité du sperme

Les conditions thermiques n'ont pas influencé la concentration du sperme ($p > 0,05$) pour les mâles F3, contrairement aux mâles F4 pour qui les concentrations en spermatozoïdes étaient plus élevées à température constante qu'à température variable (Tableau 2.3).

L'osmolarité du plasma séminal était différente entre les individus de la F3 ($p < 0,05$), mais similaire pour les deux régimes thermiques chez les individus de la F4. Les concentrations du glucose mesurées dans le plasma séminal étaient plus élevées chez les mâles maintenus à température variable que chez ceux maintenus à température constante (Tableau 2.3).

Tableau 2.3. Concentration en spermatozoïdes du sperme, diamètre des spermatozoïdes, osmolarité et concentration en glucose du plasma séminal en fonction du lieu d'élevage et de la génération.

Génération Lieu d'élevage n	Mâles			
	F3		F4	
	TV 20	TC 20	TV 10	TC 10
Nombre des SPZ ($\times 10^9$)/ml	6.54 \pm 2.48	7.8 \pm 3.2	3.04 \pm 0.92*	8.31 \pm 3.12
Diamètre des SPZ (μm)	3.04 \pm 0.16*	2.80 \pm 0.07	1.32 \pm 0.31*	2.99 \pm 0.02
Osmolarité (Mosm/L)	231.8 \pm 48.6*	189.8 \pm 55.2	261.6 \pm 43.5	241.2 \pm 58.3
Glucose (mg/L)	4.18 \pm 0.68*	3.65 \pm 0.74	5.25 \pm 0.85*	4.27 \pm 0.53

TV : Température variable (Pointe-au-Père) ; TC : Température constante (Forestville) ; F3 et F4 : générations 3 et 4. SPZ : spermatozoïdes. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. * : Indique la présence de différences significatives entre les mâles des deux milieux d'élevage. n : indique le nombre d'individus.

2.4 DISCUSSION

Dans la présente étude, le milieu d'élevage a eu un effet significatif sur la fonction reproductrice des mâles et des femelles des générations F3 et F4. Chez les femelles, la fécondité relative et le diamètre des œufs ont été les principaux paramètres affectés, alors qu'un effet significatif du milieu d'élevage a été observé pour toutes les variables étudiées chez les mâles. Nous suggérons que ces différences entre les milieux d'élevage sont essentiellement liées aux différents régimes thermiques (variable et constant).

Chez les femelles à température constante de 6°C, nous avons observé une fécondité relative plus grande, alors que les œufs avaient une plus petite taille. Ces résultats suggèrent une certaine réponse adaptative des femelles à leurs conditions thermiques. Il est possible qu'une diminution de la synthèse de la vitellogénine dans le foie ou de stockage de la vitellogénine dans les œufs des femelles gardées à température constante soit la cause de la diminution du diamètre des œufs. Des études en milieu naturel ont démontré que la température élevée de l'eau induit une diminution du diamètre des œufs de Téléostéens, en diminuant le dépôt du vitellus (e.g. Cossins et Bowler 1987 ; Kamler 1992). La relation entre le diamètre des œufs et la fécondité semble varier en fonction du milieu d'élevage. Jobling et al. (1995) ont montré que l'exposition des femelles d'Omble chevalier à une température constante de 12°C, de la mi-juin à la fin septembre, diminue non seulement le dépôt de lipides dans les œufs, mais aussi la composition de ces lipides, notamment les proportions de phospholipides et de triacylglycérols.

Les poissons maintenus à température variable avaient une masse et une longueur nettement supérieures à ceux maintenus à température constante. Le transfert estival en eau de mer des géniteurs maintenus à température variable peut être la cause de la différence de poids et longueur des mâles et femelles des deux milieux d'élevage. Chez l'Omble chevalier, l'adaptation à l'environnement marin se traduit par une augmentation de la consommation d'aliment et une augmentation du taux de croissance (Arnesen et al. 1993).

Plusieurs études indiquent l'influence de la température sur la période de frai chez l'Omble chevalier (Gillet 1991), le Saumon Atlantique (King et al. 2003) et le Loup (Tveiten et al. 2000). Dans notre cas, la température a également influencé la période de frai. Cette dernière a été décalée de deux mois pour les femelles F4 maintenues à température constante. En effet, les femelles F4 qui ont subi un changement de température tout au long du cycle reproducteur ont frayé au mois de novembre, alors que le frai n'a eu lieu qu'à la fin du mois de janvier pour les femelles maintenues à 6°C.

Chez les mâles, la température semble jouer un rôle important sur le nombre et le diamètre des spermatozoïdes, de même sur l'osmolarité et la concentration en glucose du plasma séminal. L'effet de la température sur la qualité du sperme s'observe également au niveau du glucose séminal. En effet, le sperme des mâles maintenus à température variable contient plus de glucose. Chez la Truite arc-en-ciel, le glucose séminal constitue une importante source d'énergie pour la motilité des spermatozoïdes (Lahnsteinser et al. 1993a) ou pour la synthèse des lipides endogènes utilisés comme source d'énergie par les spermatozoïdes (Lahnsteinser et al. 1993b). De plus, les mesures de la pression osmotique dans le plasma séminal indiquent une différence entre les mâles F3 et F4. Billard et Cosson (1992) indiquent qu'une pression osmotique du plasma séminal d'environ 300 mOsm Kg⁻¹ n'est pas assez élevée pour inhiber la motilité des spermatozoïdes chez la Truite arc-en-ciel.

Plusieurs auteurs ont décrit le rôle des stéroïdes sexuels dans le cycle reproducteur des Salmonidés. Des études sur les femelles de Saumon atlantique ont montré une insuffisance de la stéroïdogénèse ovarienne qui est apparue durant les derniers stades de la vitellogénèse chez les géniteurs maintenus à température élevée, alors que les concentrations plasmatiques du 17β-œstradiol et de la testostérone étaient significativement réduites chez les géniteurs maintenus à 16°C par rapport aux géniteurs maintenus à 6 et 11°C (King et Pankhurst 2000). L'évolution des deux stéroïdes sexuels chez les femelles F3 suit un patron saisonnier, soit une augmentation graduelle à partir du mois de juillet avec un pic important au mois de septembre-octobre (1 à 2 mois avant la maturation finale) suivi d'une baisse juste après la ponte. Les profils saisonniers de testostérone et de 17β-œstradiol

sont différents entre les géniteurs des deux lieux d'élevage (différents régimes thermiques). Chez le Saumon atlantique, les concentrations plasmatiques de testostérone et du 17β -estradiol étaient significativement réduites chez des géniteurs maintenus à 16°C par rapport à des géniteurs maintenus à 6°C (King et Pankhurst 2000) ce que nous avons observé, mais seulement en début d'été. De même chez d'autres Téléostéens tels que la Morue de l'Atlantique, l'exposition des géniteurs à une température de 12°C au cours de la période de frai entraîne une diminution de la concentration plasmatique de 17β -estradiol, en comparaison avec les géniteurs maintenus à 4°C et à 8°C (Tveiten 2008). Concernant les femelles F4, les patrons saisonniers de la testostérone des femelles maintenues à température constante restent plus élevés par rapport à celles maintenues à température variable.

Nos résultats indiquent d'une part qu'une température variable permet aux femelles de produire de plus gros œufs et aux mâles d'emmagasiner plus de glucose, donc plus d'énergie, dans les spermatozoïdes. D'autre part, les femelles maintenues à température constante produisent plus d'œufs, mais de petite taille. La température constante influence les concentrations plasmatiques de la testostérone et du 17β -estradiol. Ces concentrations plasmatiques constituent de bons indicateurs, non seulement pour le suivi de la maturation des ovaires ou d'éventuels changements dans la période de frai, mais aussi de la qualité des œufs.

DISCUSSION GÉNÉRALE

La première étude effectuée dans le cadre de ce mémoire avait pour objectif d'évaluer l'effet d'une sélection dirigée vers l'amélioration de la croissance et l'élimination de la maturité sexuelle précoce. La souche Laval était, au début de ces travaux, utilisée pour la première fois dans un contexte aquicole et avait été choisie sur la base de certaines caractéristiques observées dans la population sauvage (Savaria 1998 ; Bastien 2010).

Le programme de sélection chez l'Ombre de fontaine de la souche Laval a permis de démontrer qu'il est possible d'améliorer les performances pour des traits d'importance économique. Les travaux de Bastien et al. (2010) démontrent clairement qu'il est possible à la fois d'améliorer la croissance tout en réduisant l'incidence de la maturité sexuelle précoce. Les gains rapidement obtenus (suite à deux générations de sélection) laissent envisager un avenir prometteur à ce type de programme de sélection. La masse moyenne des poissons issus du programme de sélection a augmenté de plus de 20% après une génération de sélection et de plus de 30% entre la génération F2 et F3 (Bastien et al. 2010).

Les mesures de la fécondité relative, du diamètre des œufs, de la concentration en spermatozoïdes, de l'osmolarité et de la concentration en glucose du plasma séminal, nous ont permis d'évaluer l'effet de la sélection sur le succès reproducteur chez les femelles et les mâles. De façon générale, les résultats ont démontré que la sélection combinée n'a pas eu d'effet sur le succès reproducteur des femelles, ainsi que sur celui des mâles. Le programme de sélection a pu atteindre ses objectifs sans pour autant affecter la reproduction.

La température de l'eau influe sur la gamétogenèse et l'ovulation (Taranger et Hansen 1993). Ces auteurs ont émis l'hypothèse que les températures basses sont un signal qui active ou déclenche l'ovulation et l'activité de frai chez le Saumon atlantique, tandis que la température élevée peut inhiber ou retarder l'ovulation et la ponte.

Afin de déterminer l'effet de la température sur le succès reproducteur des géniteurs d'Omble de fontaine, nous avons évalué des géniteurs maintenus à deux différents sites d'élevage (Chapitre 2) ; certaines mesures n'ont pas été effectuées chez tous les individus. En effet, les poissons maintenus à température constante en entreprise privée [Aquaculture Forestville] ne pouvaient pas être sacrifiés. Nous avons pu observer qu'une température constante de 6°C améliore la fécondité des femelles, alors que le diamètre des œufs est plus petit par rapport à celui de femelles maintenues à température variable. Un élément de l'étude qui mérite attention est donc la qualité de ces œufs, principalement leur contenu lipidique (quantité et qualité). Les résultats obtenus sur les œufs prélevés au cours de mon projet indiquent que la composition lipidique en termes de grandes classes de lipides est similaire entre les deux sites, mais que les œufs de Forestville contiennent moins de lipides (données non publiées). L'analyse des acides gras essentiels est actuellement en cours, ce qui nous permettra de tirer des conclusions plus définitives sur la qualité de ces œufs. Cependant, il semblerait que la principale différence soit au niveau de la quantité de lipides de réserve, ce qui pourrait indiquer qu'à l'éclosion les alevins issus de Forestville pourraient être beaucoup plus sensibles à un manque éventuel de nourriture en période de transition entre alimentation endogène et exogène. Si tel était le cas, on pourrait également s'attendre à des succès à l'éclosion ou de survie à la première alimentation plus faible à Forestville. La taille des œufs reste un critère important puisqu'elle est associée à la taille des alevins et à leur survie (Wallace et Aasjord 1984). Selon ces auteurs, les alevins issus de plus gros œufs ont une croissance plus rapide et affichent des taux de survie largement supérieurs à ceux des alevins issus de petits œufs. Chez l'Omble de fontaine, souche Laval, soit la souche utilisée pour la présente étude, Perry et al (2004) mentionnent que la taille de l'embryon, du sac vitellin et la longueur de l'alevin sont directement corrélées avec la masse de la femelle.

Il est à noter que la température a influencé la période de frai pour les géniteurs de la génération 4. Cette dernière avait un décalage de 2 mois entre les deux lieux d'élevage, fin novembre chez les femelles maintenues à température variable et fin janvier chez les femelles maintenues à température constante. Plusieurs études indiquent que la température

en automne est en relation directe avec la synchronisation de la maturation finale et l'ovulation chez les Salmonidés (Omble chevalier : Gillet 1991; Saumon Atlantique : Taranger et al. 2003 ; King & Pankhurst 2007) alors que les températures printanières jouent un rôle dans la gamétogenèse chez le Saumon atlantique (King et al. 2003).

Un autre paramètre différent entre Forestville et Pointe-au-Père est le maintien estival des géniteurs en eau saumâtre. En effet, comme à Pointe-au-Père les bassins sont en circuit ouvert et alimentés par de l'eau de surface, le moyen le plus économique de conserver une température plus faible en été est d'utiliser une arrivée d'eau mixte (eau douce et eau de mer) à une salinité finale de 20 PSU. Ce facteur pourrait donc avoir influencé nos résultats, non entre une comparaison « géniteurs issus de la sélection » vs « géniteurs témoin » mais possiblement entre géniteurs à température variable et géniteurs à température fixe.

Il a déjà été démontré que les conditions thermiques et de salinité d'élevage des géniteurs ont des effets significatifs sur le diamètre et les paramètres biochimiques des œufs. Conformément aux résultats sur le contenu lipidique des œufs, Roche-Mayzaud et al. (1998) ont montré que la teneur en lipides totaux était plus élevée de 20% dans les œufs d'Omble de fontaines transférés en eau de mer pendant l'été par rapport à ceux produits par les femelles maintenues toute l'année en eau douce. De même, chez l'Omble chevalier, le transfert estival des femelles en eau de mer influence le contenu énergétique des œufs : les œufs des femelles ayant passé l'été en eau de mer présentent un contenu protéique et énergétique plus élevé à la ponte et au stade oillé par rapport à celui des œufs issus de géniteurs en eau douce (Atse et al. 2002). Les mêmes auteurs, soulignent l'influence du transfert des mâles d'Omble chevalier en eau de mer, les concentrations en chlore et en sodium du plasma séminal étant plus élevées chez les mâles maintenus en eau de mer. À l'inverse, la qualité des gamètes est moins bonne lorsque les géniteurs sont maintenus en eau douce.

Les résultats obtenus au chapitre 2 indiquent que les variations thermiques ont eu un effet direct sur les paramètres du succès reproducteur ainsi que sur le patron saisonnier des

deux stéroïdes sexuels (testostérone, 17β -estradiol), mais l'effet de la salinité devrait également être évalué avant de tirer des conclusions définitives. Cette partie mérite donc d'être plus approfondie afin de déterminer le milieu d'élevage qui maximisera le succès reproducteur chez l'Omble de fontaine.

En revanche, nous pouvons définitivement conclure que le succès reproducteur n'est pas affecté par la sélection. La sélection combinée semble donc être une bonne stratégie pour optimiser l'élevage chez l'Omble de fontaine sans pour autant affecter le succès reproducteur.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Aksnes, A., Gjerde, B., Roald, S.O.** 1986. Biological, chemical and organoleptic changes during maturation of farmed Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquaculture* 53, 7-20.
- Alavi, S. et Cosson, J.** 2005. Sperm motility in fishes. I. Effects of temperature and pH: a review. *Cell Biology International* 29, 101-110.
- Alavi, SMH. et Cosson, J.** 2006. Sperm motility in fishes. (II) Effects of ions and osmolality: a review. *Cell Biology International* 30, 1-14.
- Ankley, G. T., Miller, D. H., Jensena, K. M., Villeneuve, D. L. et Martinović, D.** 2008. Relationship of plasma sex steroid concentrations in female fathead minnows to reproductive success and population status. *Aquatic Toxicology* 88, 69-74.
- Arnesen, A.M., Jørgensen, E.H., et Jobling, M.** 1993. Feed intake, growth and osmoregulation in Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), following abrupt transfer from freshwater to more saline water. *Aquaculture* 114, 327-338.
- Atse, C.B., Audet, C., de la Noue, J.** 2002. Effects of temperature and salinity on the reproductive success of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.): egg composition, milt characteristics and fry survival. *Aquaculture Research* 33, 299-309.
- Audet, C., Bernatchez, L., Martin, S., Savaria, J.Y.** 1997. Amélioration génétique du cheptel d'omble de fontaine. Société de recherche et de développement en aquaculture continentale (SORDAC) Inc. Document de recherche 97, 1-27.
- Bascinar, N., et Okumus, I.** 2004. The early development of brook trout *Salvelinus fontinalis* (Mitchill): Survival and growth rates of alevins. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* 28, 297-301.
- Bastien, A.** 2010. Évaluation d'un programme de sélection et identification des traits physiologiques liés à l'anadromie chez l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). Thèse de doctorat en océanographie, Rimouski : Université du Québec à Rimouski, 150 p.
- Bastien, A., Perry, G.M.L., Savaria, J.-Y., Bernatchez, L., Audet, C.** 2010. Genetic gain for growth and delayed sexual maturation using a feral strain of anadromous brook trout. *North American Journal of Aquaculture* (sous presse).

- Bebak, J., Hankins, J.A., Summerfelt, S.T.** 2000. Effect of water temperature on survival of eyed eggs and alevins of Arctic charr. *North American Journal of Aquaculture* 62, 139-143.
- Bernatchez, L. et Dodson, J. J.** 1985. The influence of current speed and temperature on the swimming capacity of lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) and cisco (*C. artedii*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42, 1522-1529.
- Billard, R.** 1992. Reproduction in rainbow trout: sex differentiation, dynamics of gametogenesis, biology and preservation of gametes. *Aquaculture* 100, 263-298.
- Billard, R. et Cosson, M.P.** 1992. Some problems related to the assessment of sperm motility in freshwater fish. *Journal of Experimental Zoology* 261, 122-131.
- Bobé, J. et Labbé, C.** 2010. Egg and sperm quality in fish. *General and Comparative Endocrinology* 165, 535-548.
- Bromage, N., Jones, J., Randall, C., Thrush, M., Davies, B., Springate, J., Duston, J., Barker, G.** 1992. Broodstock management, fecundity, egg quality and the timing of egg production in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 100, 141-166.
- Bromage, N., Porter, M., Randall, C.** 2001. The environmental regulation of maturation in farmed finfish with special reference to the role of photoperiod and melatonin. *Aquaculture* 197, 63-98.
- Bromage, N.R. et Roberts, R.J.** 1995. *Broodstock Management and Egg and Larval Quality*. Blackwell, Oxford 424p.
- Brooks, S., Tyler, C.R., Sumpter, J.P.** 1997. Egg quality in fish: what makes a good egg? *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 7, 387-416.
- Brown, N.P., Bromage, N.R., Shields, R.J.** 1995. The effect of spawning temperature on egg viability in the Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*). *Aquaculture* 261, 993-1002.
- Charo-Karisa, H., Komen, H., Rezk, M.A., Ponzoni, R.W., van Arendonk, J.A., Bovenhuis, H.** 2006. Heritability estimates and response to selection for growth of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in low-input earthen ponds. *Aquaculture* 261, 479-486.

- Cosson, J., Billard, R., Cibert, C., Dreanno, C., Suquet, M.** 1999. Ionic factors regulating the motility of fish sperm. Dans: Gagnon C (ed). The Male Gamete: From basic knowledge to clinical applications. Cache River Press, Paris, France, 161-186.
- Cossins, A.R. et Bowler, R.K.** 1987. Rate compensations and capacity adaptations. Dans: Cossins AR & RK Bowler (eds) Temperature biology of animals. Chapman & Hall, London, United Kingdom, 155-203p.
- Crandell, P. et Gall, G.** 1993. The genetics of body weight and its effect on early maturity based on individually tagged rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture 117, 77-93.
- Dabrowski, K., Ciereszko, R.E., Ciereszko, A., Ottobre, J.S.** 2002. In vitro production of ovarian steroids in yellow perch (*Perca flavescens*): effects of photothermal manipulation, gonadotropin and phorbol ester. Reproductive Biology 2, 163-186.
- Darszon, A., Labarca, P., Nishigaki, T., Espinosa, F.** 1999. Ion channels in sperm physiology. Physiological Reviews 79, 481-510.
- Falconer, D. S., Mackay, T. F. C.** 1996 Introduction to Quantitative Genetics. Fourth Edition. Pearson Education Limited, England.
- Fernández-Palacios, H., Izquierdo, M.S., Robaina, L., Valencia, A., Salhi, M., Vergara, J.** 1995. Effect of n - 3 HUFA level in broodstock diets on egg quality of gilthead sea bream (*Sparus aurata*). Aquaculture 132, 325-337.
- Frantzen, M., Johnsen, H., Mayer, I.** 1997. Gonadal development and sex steroids in a female Arctic charr broodstock. Journal of Fish Biology 51, 697-709.
- Frantzen, M., Tveiten, H., Jobling, M.** 2008. Effects of cortisol and 11-ketotestosterone (11-KT) on testicular development and sperm quality in male spotted wolffish. Cybium 32 (Supplement), 247.
- Gillet, C.** 1991. Egg production in an Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) brood stock: effects of temperature on the timing of spawning and the quality of eggs : Production d'œufs par des géniteurs d'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) en élevage: effets de la température sur la date de fraie et sur la qualité des œufs. Aquatic Living Resources 4, 8.
- Gillet, C.** 1994. Egg production in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) broodstock: effects of photoperiod on the timing of ovulation and egg quality. Canadian Journal of Zoology 72, 334-338.

- Gjedrem, T.** 2000. Genetic improvement of cold-water fish species. *Aquaculture Research* 31, 25-33.
- Gjedrem, T.** 1997. Selective breeding to improve aquaculture production. *World Aquaculture March*, 33-45.
- Gjerde, B.** 1986. Growth and reproduction in fish and shellfish. *Aquaculture* 57, 37-55.
- Goetz, F.W., Fostier, A.Y., Breton, B., Jalabert, B.** 1987. Hormonal changes during meiotic maturation and ovulation in the brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Fish Physiology and Biochemistry* 3, 203-211.
- Hajirezaee, S., Amiri, B.M., Mirvaghefi, A.R.** 2010. Changes in sperm production, sperm motility, and composition of seminal fluid in caspian brown trout, *Salmo trutta caspius*, over the course of a spawning season. *Journal of Applied Aquaculture* 22, 157.
- Hennies, M., Wiesmann, M., Allner, B., Sauerwein, H.** 2003. Vitellogenin in carp (*Cyprinus carpio*) and perch (*Perca fluviatilis*): purification, characterization and development of an ELISA for the detection of estrogenic effects. *The Science of The Total Environment* 309, 93-103.
- Higashino, T., Miura, T., Miura, C., Yamauchi, K.** 2002. Histological studies on early oogenesis in barfin flounder (*Verasper moseri*). *Zoological Science* 19, 557-563.
- Hokanson, K.E.F., McCormick, J.H., Jones, B.R., Tucker, J.H.** 1973. Thermal requirements for maturation, spawning and embryo survival of brook trout, *Salvelinus fontinalis*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 30, 975-984.
- Holland, M.C., Hassin, S., Zohar, Y.** 2000. Gonadal development and plasma steroid levels during pubertal development in captive-reared striped bass, *Morone saxatilis*. *The Journal of Experimental Zoology* 286, 49-63.
- Jackson, L.F. et Sullivan, C.V.** 1995. Reproduction of white perch: the annual gametogenic cycle. *Transactions of the American Fisheries Society* 124, 563-577.
- Jalabert, B.** 2005. Particularities of reproduction and oogenesis in teleost fish compared to mammals. *Reproduction Nutrition Development* 45, 261-279.
- Jobling, M., Johnsen, H.K., Pettersen, G.W., Henderson, R.J.** 1995. Effect of temperature on reproductive development in Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.). *Journal of Thermal Biology* 20, 157-165.

- Johnston, I.A. et Temple, G.K.** 2002. Thermal plasticity of skeletal muscle phenotype in ectothermic vertebrates and its significance for locomotory behaviour. *Journal of Experimental Biology* 205, 2305-2322.
- Kamler, E.**, 1992. Early life history of fish: An energetics approach. Fish and Fisheries Series (4), Chapman & Hall, London, 267 p.
- Kause, A., Ritola, O., Paananen, T., Mäntysaari, E., Eskelinen, U.** 2003. Selection against early maturity in large rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*: the quantitative genetics of sexual dimorphism and genotype-by-environment interactions. *Aquaculture* 228, 53-68.
- Khan, M.N., Renaud, R.L., Leatherland, J.F.** 1997. Steroid metabolism by embryonic tissues of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *General and Comparative Endocrinology* 105, 344-357.
- King, H. R. et Pankhurst, N. W.** 2000. Ovulation of Tasmanian Atlantic salmon maintained at elevated temperatures: implications of climate change for sustainable industry development. In: B. Norberg, O.S. Kjesbu, G.L. Taranger, E. Andersson and S.O. Stefansson, Editors, proceedings of the 6th International Symposium on the Reproductive Physiology of Fish, John Grieg, Bergen, pp. 396-398.
- King, H. R. et Pankhurst, N. W.** 2007. Additive effects of advanced temperature and photoperiod regimes and LHRHa injection on ovulation in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 273, 729-738.
- King, H.R., Pankhurst, N.W., Watts, M., Pankhurst, P.M.** 2003. Effect of elevated summer temperatures on gonadal steroid production, vitellogenesis and egg quality in female Atlantic salmon. *Journal of Fish Biology* 63, 153-167.
- Kjørsvik, E., Mangor-Jensen, A., Holmefjord, I.** 1990. Egg quality in fishes. *Advances in Marine Biology* 26, 71-113.
- Kortner, T.M., Rocha, E., Silva, P., Castro, L.F., Arukwe, A.** 2008. Genomic approach in evaluating the role of androgens on the growth of Atlantic cod (*Gadus morhua*) previtellogenic oocytes. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part D: Genomics and Proteomics* 3, 205-218.
- Kwon, J.Y., Prat, F., Randall, C., Tyler, C.R.** 2001. Molecular characterization of putative yolk processing enzymes and their expression during oogenesis and embryogenesis in rainbow trout. *Biology of Reproduction* 65, 1701-1709.

- Labbé, C. et Maise, G.** 1996. Influence of rainbow trout thermal acclimation on sperm cryopreservation: relation to change in the lipid composition of the plasma membrane. *Aquaculture*145, 281-294.
- Lahnsteiner, F., Berger, B., Weismann, T., Patzner, R.** 1995. Fine structure and motility of spermatozoa and composition of the seminal plasma in the perch. *Journal of Fish Biology*47, 492-508.
- Lahnsteiner, F., Mansour, N., Berger, B.** 2004 a. The effect of inorganic and organic pollutants on sperm motility of some freshwater teleosts. *Journal of Fish Biology* 65, 1283-1297.
- Lahnsteiner, F., Patzner, R.A., Welsmann, T.** 1993 a. The spermatic ducts of salmonid fishes (Salmonidae, Teleostei). Morphology, histochemistry and composition of the secretion. *Journal of Fish Biology*42, 79-93.
- Lahnsteiner, F., Patzner, R. A., Weismann, T.**1993 b. Energy resources of spermatozoa of the rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. (Pisces: Teleostei). *Reproduction Nutrition Development* 33, 349-360.
- Lahnsteiner, F. et Patarnello, P.** 2004 b. Egg quality determination in the gilthead seabream, *Sparus aurata*, with biochemical parameters. *Aquaculture*237, 443-459.
- Lahnsteiner, F. et Patarnello, P.** 2005. The shape of the lipid vesicle is a potential marker for egg quality determination in the gilthead seabream, *Sparus aurata*, and in the sharpsnout seabream, *Diplodus puntazzo*. *Aquaculture*246, 423-435.
- Lankford, S.E. et Weber, G.M.** 2006. Associations between plasma growth hormone, insulin-like growth factor-i, and cortisol with stress responsiveness and growth performance in a selective breeding program for rainbow trout. *North American Journal of Aquaculture*68, 151-159.
- Mackay, M.E. et Lazier, C.B.** 1993. Estrogen responsiveness of vitellogenin gene expression in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) kept at different temperatures. *General and Comparative Endocrinology*89, 255-266.
- Maitra, S., Sahu, R., Trehan, N., Garg, S.K., Nath, P.** 2007. Circannual variation in plasma vitellogenin and gonadotropin II levels in relation to annual ovarian cycle in female mrigal (*Cirrhinus mrigala*). *Aquaculture* 265, 370-384.

- Malejac, M., Loir, M., Maisse, G.** 1990. Qualité de la membrane des spermatozoïdes de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*); relation avec l'aptitude du sperme à la congélation : Membrane properties of spermatozoa from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and their relationship to the freezing ability of sperm. *Aquatic Living Resources* 3, 12.
- MAPAQ 2009.** « Choix de l'espèce ». <<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Peche/aquaculture/analyseconceptionprojet/choixespece/>>. Consulté le 26 Juin 2010. Dernière mise à jour le 24 octobre 2009.
- Marchant, T.A. et Peter, R.E.** 1986. Seasonal variations in body growth rates and circulating levels of growth hormone in the goldfish (*Carassius auratus*). *The Journal of Experimental Zoology* 237, 231-239.
- Matsuyama, M., Shiraishi, T., Sundaray, J.K., Rahman, M.A., Ohta, K., Yamaguchi, A.** 2005. Steroidogenesis in ovarian follicles of chub mackerel, *Scomber japonicus*. *Zoological Science* 22, 101.
- Mellinger, J.** 2002 . Sexualité et reproduction des poissons. CNRS Éditions, Paris.
- Miller, D.H., Jensen, K.M., Villeneuve, D.L., Kahl, M.D., Makynen, E.A., Durhan, E.J., Ankley, G.T.** 2007. Linkage of biochemical responses to population-level effects: a case study with vitellogenin in the fathead minnow (*Pimephales promelas*). *Environmental Toxicology and Chemistry / SETAC* 26, 521-527.
- Mishra, A. et Joy, K.** 2006. HPLC-electrochemical detection of ovarian estradiol-17[beta] and catecholestrogens in the catfish *Heteropneustes fossilis*: Seasonal and periovulatory changes. *General and Comparative Endocrinology* 145, 84-91.
- M.L.C.P.Q.** (Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche du Québec). 1983. Méthode de Fabrication Des Règles de Von Bayer. Direction générale de la faune, 26 p.
- Modesto, T. et Canário, A.V.M.** 2003. Hormonal control of swimbladder sonic muscle dimorphism in the Lusitanian toadfish (*Halobatrachus didactylus*). *Journal of Experimental Biology* 206, 3467-3477.
- Montserrat, N., González, A., Méndez, E., Piferrer, F., Planas, J.V.** 2004. Effects of follicle stimulating hormone on estradiol-17 beta production and P-450 aromatase (CYP19) activity and mRNA expression in brown trout vitellogenic ovarian follicles in vitro. *General and Comparative Endocrinology* 137, 123-131.

- Müller, K., Müller, P., Pincemy, G., Kurz, A., Labbe, C.** 2008. Characterization of sperm plasma membrane properties after cholesterol modification: consequences for cryopreservation of rainbow trout spermatozoa. *Biology of Reproduction* 78, 390-399.
- Nilsson, J.** 1992. Genetic parameters of growth and sexual maturity in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *Aquaculture* 106, 9-19.
- Noaksson, E., Gustavsson, B., Linderöth, M., Zebühr, Y., Broman, D., Balk, L.** 2004. Gonad development and plasma steroid profiles by HRGC/HRMS during one reproductive cycle in reference and leachate-exposed female perch (*Perca fluviatilis*). *Toxicology and Applied Pharmacology* 195, 247-261.
- Nocillado, I.N., Penaflorida, V.D., et Borlongan, I.G.** 2000. Measures of egg quality in induced spawns of Asian sea bass, *Lates calcarifer* Bloch. *Fish Physiology and Biochemistry* 22, 1-9.
- Ohta K., Mine T., Yamaguchi A., Matsuyama M.** 2001. Steroidogenic pathway to estradiol synthesis in the ovarian follicles of the protogynous wrasse, *Pseudolabrus sieboldi*. *Zoological Science* 18, 937-945.
- Ohta, K., Yamaguchi, S., Yamaguchi, A., Gen, K., Okuzawa, K., Kagawa, H., Matsuyama, M.** 2002. Biosynthesis of steroids in ovarian follicles of red seabream, *Pagrus major* (Sparidae, Teleostei) during final oocyte maturation and the relative effectiveness of steroid metabolites for germinal vesicle breakdown in vitro. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* 133, 45-54.
- Pankhurst, N.W. et King, H.R.** 2010. Temperature and salmonid reproduction: implications for aquaculture. *Journal of Fish Biology* 76, 69-85.
- Pankhurst, N.W., Purser, G.J., Van Der Kraak, G., Thomas, P.M., Forteach, G.N.R.** 1996. Effect of holding temperature on ovulation, egg fertility, plasma levels of reproductive hormones and in vitro ovarian steroidogenesis in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture* 146, 277-290.
- Papadaki, M., Papadopoulou, M., Siggelaki, I., Mylonas, C.C.** 2008. Egg and sperm production and quality of sharpnose sea bream (*Diplodus puntazzo*) in captivity. *Aquaculture* 276, 187-197.
- Patiño, R. et Sullivan, C.V.** 2002. Ovarian follicle growth, maturation and ovulation in teleosts fish. *Fish Physiology and Biochemistry* 26, 57-70.

- Pavlov, D.A. et Mokness, E.** 1994. Reproductive biology, early ontogeny, and effect of temperature on development in wolffish: comparisons with salmon, *Aquaculture International* 2, 133–143.
- Perry, G.M.L., Audet, C., Laplatte, B., Bernatchez, L.** 2004. Shifting patterns in genetic control at the embryo-alevin boundary in brook charr. *Evolution* 58, 2002-2012.
- Piironen, J. et Hyvarinen, H.** 1983. Composition of the milt of some teleost fishes. *Journal of Fish Biology* 22, 351-361.
- Rinchard, J., Poncin, P., Kestemont, P.** 1998. Croissance ovocytaire et régulation stéroïdienne chez les poissons à pontes unique et multiples : une revue. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology* 34, 15.
- Roche-Mayzaud, O., Audet, C., Mayzaud, P.** 1998. Changes in lipid classes and trypsin activity during the early development of brook charr(*Salvelinus fontinalis*) fry. *Aquaculture Research* 29, 137-152.
- Roff, D. A.** 1997. *Evolutionary Quantitative Genetics*. Chapman & Hall, New York.
- Savaria, J.Y.** 1998. « Amorce d'un programme de sélection génétique chez deux souches d'ombles de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) en fonction des critères de croissance et de l'âge à la maturation sexuelle ». Mémoire de maîtrise en océanographie. Université du Québec à Rimouski. Québec, Canada. 97 p.
- Scott, A.P. et Baynes, S.M.** 1980. A review of the biology, handling and storage of salmonid spermatozoa. *Journal of Fish Biology* 17, 707-739.
- Shields, R.J., Brown, N.P., Bromage, N.R.** 1997. Blastomere morphology as a predictive measure of fish egg viability. *Aquaculture* 155, 1-12.
- Silverstein, J.T., Vallejo, R.L., Palti, Y., Leeds, T.D., Rexroad, C.E., Welch, T.J., Wiens, G.D., Ducrocq, V.** 2009. Rainbow trout resistance to bacterial cold-water disease is moderately heritable and is not adversely correlated with growth. *Journal of Animal Science* 87, 860-867.
- Sokal, R. R. et Rohlf, F. J.** 1995. *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. 3rd edition. W. H. Freeman and Co. New York. 887 pp.
- Sparks, R.T., Shepherd, B.S., Ron, B., Harold Richman, N., Riley, L.G., Iwama, G.K., Hirano, T., Gordon Grau, E.,** 2003. Effects of environmental salinity and 17[alpha]-methyltestosterone on growth and oxygen consumption in the tilapia, *Oreochromis mossambicus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* 136, 657-665.

- Springate, J. et Bromage, N.** 1985. Effects of egg size on early growth and survival in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aquaculture* 47, 163-172.
- Springate, J., Bromage, N., Elliott, J., Hudson, D.** 1984. The timing of ovulation and stripping and their effects on the rates of fertilization and survival to eying, hatch and swim-up in the rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aquaculture* 43, 313-322.
- Srivastava, R.K. et Brown, J.A.** 1991. The biochemical characteristics and hatching performance of cultured and wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) eggs. *Canadian Journal of Zoology* 69, 2436-2441.
- Sulistyo, I., Rinchar, J., Fontaine, P., Gardeur, J., Capdeville, B., Kestemont, P.** 1998. Reproductive cycle and plasma levels of sex steroids in female Eurasian perch (*Perca fluviatilis*). *Aquatic Living Resources* 11, 101-110.
- Suquet, M., Omnes, M., Normant, Y., Fauvel, C.** 1992. Assessment of sperm concentration and motility in turbot (*Scophthalmus maximus*). *Aquaculture* 101, 177-185.
- Taranger, G.L. et Hansen, T.** 1993. Ovulation and egg survival following exposure of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., broodstock to different water temperatures. *Aquaculture Research* 24, 151-156.
- Taranger, G., Vikingstad, E., Klenke, U., Mayer, I., Stefansson, S., Norberg, B., Hansen, T., Zohar, Y., Andersson, E.** 2003. Effects of photoperiod, temperature and GnRHa treatment on the reproductive physiology of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) broodstock. *Fish Physiology and Biochemistry* 28, 403-406.
- Tveiten, H.** 2008. Temperature influence on reproductive development and gamete quality in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Cybium* 32 (Supplement), 195.
- Tveiten, H., Scott, A.P., Johnsen, H.K.** 2000. Plasma-sulfated c21-steroids increase during the periovulatory period in female common wolffish and are influenced by temperature during vitellogenesis. *General and Comparative Endocrinology* 117, 464-473.
- Tveiten, H., Solevag, S.E., Johnsen, H.K.** 2001. Holding temperature during the breeding season influences final maturation and egg quality in common wolffish. *Journal of Fish Biology* 58, 374-385.
- Tyler, C.R. et Sumpter, J.P.** 1996. Oocyte growth and development in teleosts. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 6, 287-318.

- Valdebenito, I., Fletcher, C., Vera, V., Fernandez, J.** 2009. Physical-chemical factors that regulate spermatid motility in fish: basic and applied aspects. A review. *Archivos de Medicina Veterinaria* 41, 97-106.
- Van Der Kraak, G., Pankhurst, N.W.** 1997. Temperature effects on the reproductive performance of fish. Dans : *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish*. Society for Experimental Biology Seminar Series 61 (Wood, C. M. & McDonald, D. G., eds), pp. 159-176. Cambridge : Cambridge University Press.
- Wallace, J.C. et Aasjord, D.** 1984. An investigation of the consequences of egg size for the culture of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *Journal of Fish Biology* 24, 427-435.
- Watts, M., Pankhurst, N.W., King, H.R.** 2004. Maintenance of Atlantic salmon (*Salmo salar*) at elevated temperature inhibits cytochrome P450 aromatase activity in isolated ovarian follicles. *General and Comparative Endocrinology* 135, 381-390.
- Wootton, R. J.** 1992. Constraints in the evolution of fish life histories. *Netherlands Journal of Zoology* 42, 291-303.
- Whitehead, C., Bromage, N., Breton, B.** 1983. Changes in serum levels of gonadotropin, oestradiol 17[beta] and vitellogenin during the first and subsequent reproductive cycles of female rainbow trout. *Aquaculture* 34, 317-326.
- Winkelman, A. et Peterson, R.** 1994. Genetic parameters (heritabilities, dominance ratios and genetic correlations) for body weight and length of chinook salmon after 9 and 22 months of saltwater rearing. *Aquaculture* 125, 31-36.

