



SODIM

Société de développement de l'industrie maricole inc.

*Remplacement de l'huile de poisson par
différentes huiles végétales et modification
des ratios protéine : lipide dans la moulée*

Rapport final

Dossier n° 710.80

Rapport commandité par la SODIM

RÉSUMÉ

Le projet de maîtrise vise à contribuer au développement durable de l'aquaculture en remplaçant l'huile de poisson à 75 % par de l'huile végétale (soya, canola, mélange de canola et d'algues) dans la moulée de salmonidés. De plus, les ratios protéines digestibles/énergie digestible (PD/ED) ont été modifiés pour minimiser l'utilisation de sous-produits de poissons sauvages. Contrairement à l'huile de poisson qui est dispendieuse et contient des polluants organiques persistants (POPs), nous prévoyons que l'huile végétale permettra de réduire les coûts de production et l'exposition aux contaminants pour les poissons et pour les consommateurs. De plus, elle ne modifiera pas les propriétés sensorielles des filets et sera hautement digestible pour la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). Enfin, l'huile de canola, avec ou sans *Schizochytrium* sp., permettra de remplacer l'huile de poisson sans affecter la qualité des filets, suite à une courte période de finition pour restaurer les niveaux bénéfiques d'acides gras essentiels.

ABSTRACT

The Master's degree project seeks to contribute to the development of sustainable aquaculture. A high percentage of fish oil (75 %) was replaced by vegetable oils (soybean, canola and a blend of canola and algae) and digestible protein/digestible energy (DP/DE) levels were modified to minimize the utilisation of wild fish by-products. Unlike fish oil, vegetable oils are less expensive and do not accumulate persistent organic pollutants (POPs), so we predict that production costs can be lowered with vegetable oil-based diets, as well as contaminant exposure for fish and consumers. Additionally, these feeds will not alter organoleptic properties of the fillets and will be highly digestible for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Furthermore we expect that canola oil, with or without *Schizochytrium* sp., can effectively replace fish oil without altering the quality of the fillets, after a short finishing period to restore beneficial fatty acid levels.

AVANT-PROPOS

Je remercie d'abord mon directeur, Grant W. Vandenberg, qui a su m'apporter les conseils techniques et le support nécessaire du début à la fin de ce projet. Je remercie aussi les chercheurs suivants qui m'ont communiqué avec ouverture leurs connaissances et leurs conseils lors de l'élaboration du projet, des analyses et de la rédaction : P. Ayotte, J.L. Bailey, D. Bureau, Y. Chouinard, É. Dewailly, A. Leblanc et J.-P. Weber. Merci aussi à B. Bullis et É. Laurin de chez Advanced BioNutrition (MD, É.-U.).

Pour leur soutien financier, je remercie EWOS inc. (Surrey, CB), la Société de Recherche et de Développement en Aquaculture Continentale (SORDAC) inc. (Québec, QC), la Société de Développement de l'Industrie Maricole (SODIM) inc. (Gaspé, QC), le Réseau Aquaculture Québec (RAQ) (Rimouski, QC), *Bi-Pro Marketing ltd.* (Guelph, ON) et *Canola Council of Canada* (Winnipeg, MB).

Merci aux compagnies suivantes pour avoir fourni le matériel et les ingrédients nécessaires aux expériences: Advanced BioNutrition (Columbia, MD) pour les algues (S-Type Gold Fat), Soya Excel (Beloeil, QC) pour l'huile de soya, Bunge (Montréal, QC) pour l'huile de canola et PerOs (St-Nicolas, QC) pour l'équipement de fabrication de moulée.

Pour leur soutien technique, je tiens à remercier les membres du groupe Vandenberg; A. Desmeules, É. Boucher, G. Dagenais, S. Houle, D. Proulx et É. Proulx. Merci aux étudiants d'été qui ont grandement contribué aux analyses de laboratoire et à la fabrication de la moulée; A. Dubé, S. Lefebvre et S.-M. Scantland-Marchand. Merci aux techniciens et animaliers du Larsa et du Département des Sciences Animales de l'Université Laval: O. Fecteau, F. Giguère, M. Gingras, R. Prince et J.-C. Therrien. Un merci spécial pour N. Durand et J. Fortin du Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments (CRDA) (Saint-Hyacinthe, QC) pour leur précieuse aide lors des analyses sensorielles. Finalement, merci à R. Gervais pour son aide en laboratoire, N. Gruyer et G. Ayotte pour les statistiques et B. Chabot pour la fabrication de la moulée.

Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille, mon conjoint et mes amis pour leur support moral tant apprécié durant ce projet.

Amélie Bélanger-Lamonde, B.Sc.

Grant W. Vandenberg, Ph.D.
Directeur

LISTE DES ABRÉVIATIONS

1-s	=	Proportion of reference diet in test diet
β-HCH	=	Beta-hexachlorocyclohexane
AA	=	Acide arachidonique
ACIA	=	Agence Canadienne d'Inspection des Aliments
ACP	=	Acyl carrier protein
AD	=	Algal diet
ADC	=	Apparent digestibility coefficient
ADC_I	=	Apparent digestibility coefficient of test ingredient
ADC_R	=	Apparent digestibility coefficient of reference diet
ADC_T	=	Apparent digestibility coefficient of test diet
ADH	=	Acide docosaheptaénoïque
ADHD	=	Déficit d'attention avec hyperactivité
ADN	=	Adénosine désoxyribonucléique
AEP	=	Acide eicosapentaénoïque
AGPLC	=	Acide gras polyinsaturé à longue chaîne
AIA	=	Ash insoluble in acid
ALA	=	Alpha-linolenic acid
ANOVA	=	Analyse de variance / Analysis of variance
AOAC	=	Association of Official Analytical Chemists
BPC	=	Biphényl polychloré
CB	=	Colombie-Britannique
CF	=	Condition factor
CMLV	=	Cellule musculaire lisse vasculaire
CO	=	Canola oil
CoA	=	Coenzyme A
COS	=	Blend of canola oil and <i>Schizochytrium</i> sp.
CRBM	=	Centre de Recherche en Biotechnologies Marines
CRDA	=	Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments
D	=	% nutrient (or kJ/g gross energy) of diet
DDT	=	Dichlorodiphényltrichloroéthane
DGLA	=	Acide diholo gamma-linolénique / Dihomo gamma-linolenic acid
DH	=	Déhydrase
DHA	=	Docosaheptaénoic acid
D_i	=	% digestion indicator (AIA) of diet
DLPCB	=	BPC analogue / Dioxin-like PCB
DERE	=	Rétention d'énergie digestible
DNRE	=	Rétention d'azote digestible
DM	=	Dry matter
DPA	=	Acide docosapentaénoïque / Docosapentaénoic acid
DP/DE	=	Digestible protein / Digestible energy
D_R	=	% nutrient (or kJ/g gross energy) of reference diet
D_T	=	% nutrient (or kJ/g gross energy) of test diet
ECR	=	Economic conversion ratio
EDPB	=	Éthers diphényliques polybromés
EFA	=	Essential fatty acid

EFAci =	Efficacité alimentaire ou FCR ⁻¹
EPA =	Eicosapentaenoic acid
ER =	Enoyl réductase
É.-U. =	États-Unis
F =	% nutriment (or kJ/g gross energy) of feces
FAO =	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture / Food and Agriculture Organization
F_i =	% digestion indicator (AIA) of feces
FAME =	Fatty acid methyl esters
FAS =	Fatty acid synthase
FCR =	Feed conversion ratio
FDA =	Food and Drug Administration
FO =	Fish oil
GC FID =	Gas chromatograph - flame ionization detector
GLA =	Acide gamma-linolénique
HCB =	Hexachlorobenzene
HCH =	Hexachlorocyclohexane
HIS =	Hepatosomatic index
ICA =	Indice de conversion alimentaire
IL =	Illinois
INSPQ =	Institut National de Santé Publique du Québec
KR =	3-ketoacyl-ACP réductase
KS =	3-ketoacyl synthase
LA =	Acide linoléique / Linoleic acid
LC-PUFA =	Long chain polyunsaturated fatty acid
LDL =	Low density lipoprotein
LT =	Leucotriène
MAAO =	Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario
MB =	Manitoba
MD =	Maryland
MeHg =	Méthylmercure
MS-222 =	Tricaine methanesulphonate
MUFA =	Monounsaturated fatty acid
N =	Nitrogen
NADPH =	Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate-oxydase
NB =	New-Brunswick
NC =	North Carolina
NRC =	National Research Council
OMS =	Organisation Mondiale de la Santé
ON =	Ontario
PBB =	Polybromodiphényle / Polybrominated Biphenyl
PBDE =	Polybrominated Diphenyl Ether
PC =	Phosphatidylcholine
PCB =	Polychlorinated biphenyl
PCDD/F =	Dibenzo- <i>p</i> -dioxine et dibenzofurane / Dibenzo- <i>p</i> -dioxin and dibenzofuran
PD/ED =	Protéines digestibles/Énergie digestible
PE =	Phosphatidyléthanolamine

PKS =	Bacterial-like polyketide synthase
ppb =	Partie par milliard / Part per billion
pp'DDE =	Dichlorodiphenyldichloroethylene
pp'DDT =	Dichlorodiphényltrichloroethane
ppm =	Partie par million / Part per million
PUFA =	Polyunsaturated fatty acid
POP =	Polluant organique persistant / Persistent organic pollutant
QC =	Québec / Quebec
RAQ =	Réseau Aquacole de Québec
RD =	Reference diet
s =	Proportion of test ingredient in test diet
SFA =	Saturated fatty acid
SO =	Soybean oil
SODIM =	Société de Développement de l'Industrie Maricole
SORDAC =	Société de Recherche et de Développement en Aquaculture Continentale
TCDD =	2,3,7,8-tetrachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxine / 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo- <i>p</i> -dioxin
TFA =	Total fatty acid
TGC =	Thermal growth-unit coefficient
TL =	Total lipid
US =	United States
US-EPA =	United States Environmental Protection Agency
VLDL =	Very low density lipoprotein

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
ABSTRACT.....	II
AVANT-PROPOS.....	III
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Liste des abréviations.....	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1. REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
1. Les POPs et le mercure.....	5
1.1. Identification et dangers pour l'homme.....	5
1.1.1. Le mercure.....	5
1.1.2. Les BPC.....	6
1.1.3. Les pesticides organochlorés.....	6
1.1.4. Les agents ignifuges organobromés.....	7
1.2. Contamination chez les salmonidés.....	8
2. Acides gras à longue chaîne polyinsaturés (AGPLC).....	11
2.1. Propriétés des AGPLC.....	11
2.2. Les ACPLC et l'homme.....	12
2.3. Consommation recommandée en AGPLC.....	14
3. Remplacement de l'huile de poisson par de l'huile végétale dans la moulée.....	16
3.1. Les enjeux.....	16
3.2. L'huile d'olive.....	17
3.3. L'huile de palme.....	18
3.4. L'huile de lin.....	19
3.5. L'huile de tournesol.....	20
3.6. L'huile de soya.....	21
3.7. L'huile de canola.....	23
3.8. Réduction de la bioaccumulation des POPs par les huiles végétales.....	24
4. Manipulation des ratios protéines/énergie.....	25
4.1. Croissance et efficacité alimentaire (EFAci).....	25
4.2. Rétention d'azote digestible (DNRE) et rétention d'énergie digestible (DNRE).....	26
5. Le <i>Schizochytrium</i> sp. comme source d'ADH.....	27
5.1. Présentation du <i>Schizochytrium</i> sp.....	27
5.2. Synthèse d'ADH.....	29
6. Période de finition ou « wash-out ».....	31
6.1. Rétablir les niveaux d'AEP et d'ADH.....	31
6.2. Des études optimistes.....	31
CHAPITRE 2. DIGESTIBILITY TRIAL OF <i>SCHIZOCHYTRIUM</i> SP. IN RAINBOW TROUT (<i>ONCORHYNCHUS MYKISS</i>) FEED: AN APPROACH TO FISH OIL REPLACEMENT.....	36
Résumé.....	37
Abstract.....	37

Avant-propos.....	38
1. Introduction.....	39
2. Materials and methods.....	40
2.1. Feeds.....	40
2.2. Fish and feeding.....	40
2.3. Chemical composition.....	42
2.4. Statistical analysis.....	43
3. Results.....	43
3.1. Apparent digestibility of nutrients and gross energy.....	43
3.2. Apparent digestibility of fatty acids.....	43
4. Discussion.....	44
4.1. Apparent digestibility according to water temperature.....	44
4.2. Digestibility of <i>Schizochytrium</i> sp.	45
5. Conclusion.....	46
Acknowledgments.....	46

CHAPITRE 3. VEGETABLE OILS AS SUSTAINABLE FISH OIL SUBSTITUTES IN RAINBOW TROUT DIETS: AN APPROACH TO REDUCE CONTAMINANT EXPOSURE AND FEED COSTS.....49

Résumé.....	50
Abstract.....	50
Avant-propos.....	51
1. Introduction.....	52
2. Materials and methods.....	54
2.1. Fish and feeding.....	54
2.2. Feeds.....	55
2.2.1. Growth period.....	55
2.2.2. Wash-out period.....	56
2.3. Sampling procedure and evaluation of growth parameters.....	56
2.3.1. Growth period.....	56
2.3.2. Wash-out period.....	57
2.4. Chemical composition.....	57
2.5. Digestibility measurements.....	58
2.6. Contaminant exposure.....	59
2.7. Organoleptic properties.....	60
2.8. Economic estimates.....	61
2.9. Statistical analysis.....	61
3. Results.....	62
3.1. Growth period.....	62
3.2. Wash-out period.....	63
3.3. Digestibility of experimental diets.....	65
3.4. Contaminant loading.....	65
3.5. Organoleptic properties.....	66
3.6. Economic estimates.....	66
4. Discussion.....	66
4.1. Growth period.....	67
4.2. Wash-out period.....	70

4.3. Contaminant loading.....	72
4.4. Suitability of experimental diets for the industry.....	74
4.4.1. Sensory parameters.....	74
4.4.2. Digestibility of experimental diets.....	74
4.4.3. Economic parameters.....	76
5. Conclusion.....	77
Aknowledgments.....	78
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	91
RÉFÉRENCES.....	94
RÉFÉRENCES EN LIGNE.....	109

LISTE DES FIGURES

- FIGURE 1.** Formation d'AGPLC chez les microorganismes, via la voie conventionnelle de la FAS29
- FIGURE 2.** Voie suggérée de la PKS utilisée par *Schizochytrium* sp. pour la fabrication d'ADH.....30
- FIGURE 3.** Concentrations of (A) PCBs (ppb), (B) Organochlorine pesticides (ppb), (C) Toxaphenes (ppb) and (D) Flame retardants (ppb) in experimental diets.....89
- FIGURE 4.** Concentrations of (A) PCBs (ppb), (B) Organochlorine pesticides (ppb), (C) Toxaphenes (ppb) and (D) Flame retardants (ppb) in initial fish, at the end of growth trial and at the end of wash-out trial.....90

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. Feed components (g/kg dry matter) of experimental diets and chemical composition of <i>Schizochytrium</i> sp.....	47
TABLEAU 2. Fatty acid profile and chemical composition of feed and apparent digestibility coefficients (ADC) of <i>Schizochytrium</i> sp. when replacing 30 % of a reference diet and fed to rainbow trout nine days, at two water temperatures, 8 and 15 °C (mean ± SD, n = 2).....	48
TABLEAU 3. Feed components and chemical composition of experimental diets (g/kg dry matter).....	79
TABLEAU 4. Fatty acid profile of experimental diets (% of total fatty acids).....	80
TABLEAU 5. Effect of fish oil replacement with soybean oil, canola oil and a blend of canola oil and <i>Schizochytrium</i> sp. biomass on rainbow trout growth, nutritive utilization and somatic parameters during growth trial.....	81
TABLEAU 6. Effects of fish oil replacement with soybean oil, canola oil, and a blend of canola and <i>Schizochytrium</i> sp. biomass on fillet composition (g/kg DM) and fatty acid profile (% of total fatty acids).....	82
TABLEAU 7. Effect of feeding with a wash-out diet of herring oil on rainbow trout growth, nutritive utilization and somatic parameters.....	83
TABLEAU 8. Effects of feeding with a wash-out diet of herring oil on fillet composition (g/kg DM) and fatty acid profile (% of total fatty acids).....	84
TABLEAU 9. Apparent digestibility coefficients (ADC) of experimental diets (%).....	85
TABLEAU 10. Mean ranks of rainbow trout flesh for fish flavour, off-flavour and firmness, evaluated according to experimental diets. Rank range from 1 to 4: 1, most intense flavour or pronounced firmness; 4, less intense flavour or pronounced firmness.....	86
TABLEAU 11. Price of raw ingredients of the feeds in 2007 (\$CAN/kg).....	87
TABLEAU 12. Economic parameter results for experimental diets and estimation for an average farm (300 tonnes/year).....	88

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les années 1970, l'industrie de l'aquaculture connaît une croissance exponentielle mondiale de production de poissons marins et d'eau douce, de mollusques, de crustacés, de plantes aquatiques et autres produits de la mer. Contribuant à seulement 3,9 % de la production totale de produits de la mer en 1970, cette industrie représentait 32,4 % en 2004 (FAO, 2007). Le taux de croissance moyen est d'ailleurs le plus élevé de l'industrie de l'alimentation, avec 8,8 % par année, contre 1,2 % pour les pêches et 2,8 % pour les animaux terrestres. En 2004, la production totale mondiale de l'aquaculture se chiffrait à 59,4 millions de tonnes, représentant 70,3 milliards \$US (FAO, 2007). Pour les salmonidés seulement, 1 978 109 tonnes ont été produites mondialement en 2004 (6 637 026 \$US) (FAO, 2004), dont 55,6 % en Europe. Au Canada, les principales espèces élevées sont le saumon Atlantique et du Pacifique. La truite arc-en-ciel n'est pas encore considérée comme une ressource importante. En effet, sur 101 645 tonnes de salmonidés produites en 2004, 1 150 tonnes étaient de la truite arc-en-ciel, représentant 315 046 millions \$US et 4 519 millions \$US respectivement. La production canadienne connaît une croissance similaire par rapport à la production mondiale. En effet, de 1994 à 2004, la production mondiale de salmonidés a augmenté de 243 %, tandis que la production canadienne a augmenté d'environ 251 %. Pour sa part, la production de truite arc-en-ciel a connu une croissance plus modeste, avec 138 % d'augmentation en 10 ans au Canada (FAO, 2004).

Mondialement, la principale cause de l'augmentation de la production est reliée à l'accroissement de la demande en produits de la mer. En effet, la population humaine croît rapidement et la consommation journalière a augmenté *per capita* depuis quelques années. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (2007), on estimait d'ailleurs à 20 % l'apport total en protéines animales provenant de poissons en 2004. De plus, la malnutrition est en baisse mondialement. Entre 1969-1971 et 2000-2002, elle a diminué de 16 %, dont 25 % dans les pays en développement (FAO, 2007). De 1983 à 2003, la consommation de poisson *per capita* dans ces pays a doublé, passant de 7,7 kg à 14,6 kg, grâce à l'amélioration des techniques de production, de commercialisation et à la fixation des prix qui ont permis de rendre le poisson plus abordable (FAO, 2007). La

conscientisation du public face aux propriétés nutritives du poisson, surtout les poissons gras comme les salmonidés, influence aussi l'industrie de l'aquaculture. En outre, il est reconnu qu'une alimentation riche en poissons gras aide à la croissance et au développement du fœtus et de l'enfant, tout en contribuant à prévenir la démence, les maladies coronariennes et l'évolution des maladies dégénératives (Horrocks et Yeo, 1999). Dans le cadre d'un programme de mise en forme, le poisson est recommandé pour atteindre et maintenir un poids santé tout en fournissant les protéines, acides gras, acides aminés, vitamines et minéraux nécessaires au bon fonctionnement du corps (*American Heart Association*, 2000). L'industrie de l'aquaculture s'est donc développée considérablement grâce à l'amélioration de la qualité de vie des consommateurs et de la mise en marché.

En 2005, on estimait que la moitié des stocks sauvages était exploité à leur maximum (52 %) et que le quart était soit surexploité (17 %), en déclin (7 %) ou en train de se remettre de la surexploitation (1 %) (FAO, 2007). Les pêcheries ne peuvent donc plus compenser pour l'augmentation de la demande, ce qui laisse à l'aquaculture la pleine possibilité d'expansion. Depuis la moitié des années 80, plusieurs espèces à haute valeur commerciale ont d'ailleurs vu leur approvisionnement principal passer des pêches à l'aquaculture et leurs prix ont diminué considérablement, comme dans le cas des crevettes, du saumon et des bivalves (FAO, 2007). Contrairement à l'élevage des animaux terrestres, l'industrie de l'aquaculture élargit constamment la diversité des produits de consommation. En 2004, les espèces officiellement cultivées étaient estimées à 240 (94 familles), ce qui représente 20 espèces de plus qu'en 2002 (FAO, 2007).

La moulée de poissons d'élevage carnivores est fabriquée à base de poissons sauvages. En 2004, on estimait que 25 % (34,8 millions de tonnes) des captures mondiales étant destinées à la production de farine et d'huile de poisson (FAO, 2007). Ainsi, l'industrie ne contribue pas réellement à diminuer la pression sur les stocks sauvages, car elle se nourrit de ces mêmes stocks pour produire du poisson d'élevage. L'huile et la farine de poisson sont des ingrédients très onéreux et on prévoit que leur coût augmentera avec le déclin des stocks sauvages. L'industrie aquacole est donc dépendante non seulement de la disponibilité des

stocks sauvages pour fabriquer la moulée, mais aussi des fluctuations des prix des sous-produits de poissons.

Les huiles végétales sont des alternatives intéressantes afin de remplacer partiellement l'huile de poisson dans la moulée, car elle sont accessibles et peu coûteuses (Bimbo, 1990). Elles sont aussi dépourvues de POPs et mercure, ce qui permet de réduire l'exposition des poissons à ces contaminants. De plus, leur utilisation réduit la pression d'exploitation sur les stocks sauvages en minimisant la quantité totale de sous-produits de poissons inclus dans la moulée. Cependant, les huiles végétales ont un profil en acides gras différent des huiles de poissons, surtout concernant les acides gras polyinsaturés à longues chaînes (AGPLC) bénéfiques pour la santé. Ces huiles peuvent donc influencer négativement la qualité de la chair en réduisant la concentration en AGPLC et diminuer l'appétence en modifiant les propriétés sensorielles du poisson. Cependant, en combinant une source élevée d'AGPLC, par exemple le *Schizochytrium* sp, une microalgue marine, à une moulée à base d'huile végétale, la qualité du poisson pourrait être conservée tout en y combinant les avantages des huiles végétales pour le développement d'une aquaculture durable.

CHAPITRE 1
REVUE DE LITTÉRATURE

1. Les POPs et le mercure

1.1. Identification et dangers pour l'homme

Les polluants organiques persistants (POPs) sont des composés industriels à base de carbone hautement toxiques, lipophiles, hydrophobes et persistants dans l'environnement comme dans les organismes. Les POPs représentent, entre autres, les biphényles polychlorés (BPC), les toxaphènes, les pesticides organochlorés et les agents ignifuges organobromés. Les POPs et les métaux lourds comme le mercure sont des composés hautement persistants dans la nature, se bioaccumulent le long de la chaîne alimentaire et sont liposolubles. Puisque l'homme se retrouve au sommet de cette chaîne, il accumule ces contaminants dans ses tissus adipeux ce qui peut entraîner un risque à long terme pour sa santé (Environnement Canada, 2004).

1.1.1. Le mercure

Ce métal est liquide à température ambiante, un bon conducteur d'électricité et réagit aux moindres changements de pression et de température (Environnement Canada, 2004). Ses propriétés permettent son utilisation dans plusieurs produits, tels les thermomètres, sondes gastriques, dilatateurs œsophagiens, amalgames dentaires, piles, interrupteurs, etc. L'augmentation de mobilisation de mercure a conduit à son accumulation dans les différentes couches de la biosphère. Dans l'environnement, le mercure se transforme en méthylmercure (MeHg), fortement toxique (Environnement Canada, 2004). Sous cette forme, le MeHg peut se bioaccumuler et se bioamplifier dans les tissus le long de la chaîne alimentaire. Les organismes au sommet de cette chaîne, les carnivores, sont donc plus exposés à de fortes quantités de mercure, notamment les salmonidés et l'homme. La consommation de poissons contaminés constitue l'une des principales causes d'intoxication alimentaire au mercure et présente des risques importants pour la santé, particulièrement chez les jeunes enfants et les fœtus qui peuvent voir leurs développements physique et psychologique ralentis par rapport à la moyenne (Myers et al., 1999).

1.1.2. Les BPC

Les biphényles polychlorés (BPC) sont résistants à la combustion, stables, peu volatils à température normale et d'excellents isolants électriques (Conseil Canadien des Ministres des Ressources et de l'Environnement, 1986). Ils forment une famille de 209 congénères dont 12 sont classés comme « dioxine-like » ou BPC analogues (DLPCB) car leur toxicité est similaire à celle ces dioxines. Le congénère le plus toxique est le 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxine (TCDD) (Van den Berg et al., 1998), un DLPCB potentiellement cancérigène (Travis et Hattemer-Frey, 1991). Les BPC ont été utilisés mondialement, notamment dans les équipements électriques, les résines synthétiques, les caoutchoucs, les colles, les plastiques, les fluides hydrauliques et les asphaltes. Les gouvernements ont interdit leur production et leur rejet au début des années 1980 (Conseil Canadien des Ministres des Ressources et de l'Environnement, 1986) dû à leurs effets perturbateurs sur l'environnement et l'homme.

Des études sur des rats de laboratoire concluent à une influence des BPC sur les systèmes reproducteurs et endocriniens, ainsi que sur la croissance des jeunes (Cooke et al., 1996; Faqi et al., 1998; Kim, 2001; Hsu et al., 2003; Rozman et al., 2005). Chez l'homme, les conséquences pour la santé sont visibles, surtout chez le fœtus et l'enfant. En outre, chez les enfants provenant de populations consommant beaucoup de poisson, l'exposition prolongée aux dioxines pourrait avoir un effet immunosuppresseur (Nagayama et al., 1998) et provoquer des dommages neurologiques (Jacobson et Jacobson, 1997). Les DLPCB peuvent perturber les systèmes reproducteur, endocrinien, cardiovasculaire, circulatoire et respiratoire de l'homme. Ces effet sont habituellement observés suite à des contaminations accidentelles ou excessives (Bertazzi et al., 2001; Kogevinas, 2001; Lin et al., 2004).

1.1.3. Les pesticides organochlorés

Les pesticides organochlorés (toxaphène, chlordane, dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), mirex, aldrine, endrine, dieldrine, andrine, endosulfane, heptachlore, hexachlorobenzène (HCB), hexachlorocyclohexane technique (HCH) et lindane) ont fait leur apparition dans les années 1940-1950. Ils ont été utilisés mondialement en agriculture

et en industrie comme biocides de toutes sortes (Environnement Canada, 2002). Ce sont des composés ubiquitaires et sont fortement persistants. Par exemple, la concentration de HCB n'a pas diminuée depuis 1975 dans la région des Grands Lacs et la demi-vie de l'endrine est de douze ans (Environnement Canada, 2002).

Ces POPs entrent dans l'écosystème et nuisent à la faune. Entre autres, le DDT et le HCB se bioaccumulent et se bioconcentrent dans les graisses animales où ils ont des effets hautement mutagènes et cancérigènes (Environnement Canada, 2002). Pour sa part, le toxaphène comprend plusieurs congénères à toxicité aiguë et chronique pour la faune terrestre et aquatique et peut entraîner des troubles neurologiques, respiratoires, cardiaques et la mort (Environnement Canada, 2002). L'utilisation de masse des pesticides organochlorés a aussi entraîné des effets néfastes sur l'environnement. Notamment, il a été démontré qu'ils contribuent à l'amincissement de la coquille des œufs de divers espèces d'oiseaux (Peakall et al., 1973). De plus, la différenciation des sexes et le développement normal des ovipares sont influencés par ces polluants antagonistes ou protagonistes du système hormonal (Guillette et al., 1994; Guillette et al., 1996). Les effets perturbateurs sur les systèmes endocriniens et reproducteurs de l'homme ne sont pas clairement démontrés, mais plusieurs études sont en cours (Lopez-Espinosa et al., 2006; Meeker et al., 2007). Dans les pays industrialisés, la plupart de ces pesticides ont été bannis et remplacés par des organophosphatés, puis par des carbamates, des pyréthroïdes et des pesticides naturels (Environnement Canada, 2002). Les pesticides actuels sont donc moins persistants dans l'environnement et leur spécificité est accrue, comparativement aux pesticides dit « de première génération » à large spectre dont font partie les pesticides organochlorés (Maguire et al., 2003). Cependant, plusieurs pesticides organochlorés sont encore utilisés mondialement, tel le chlordane, un insecticide pouvant altérer la qualité des érythrocytes chez l'homme (Suwalsky et al., 2005).

1.1.4. Les agents ignifuges organobromés

Parmi les 70 classes d'agents ignifuges, on retrouve les polybromodiphényles (PBB) et les éthers diphényles polybromés (EDPB). Ces produits de synthèse sont utilisés comme

ignifugeants dans diverses matières plastiques, tel le polystyrène. La fabrication des PBB a été bannie mondialement en 2005 due à leur toxicité, par contre les EDPB ne sont pas encore contrôlés (Environnement Canada, 2004). Ces composés synthétiques pénètrent dans l'environnement soit par l'air ou par l'eau et s'accumulent ensuite dans les tissus adipeux. De plus, les produits de dégradation ont une activité hormonale supérieure à celle des substances d'origine (Environnement Canada, 2004). L'accumulation des produits de dégradation a considérablement augmenté dans le sang, le foie, les tissus adipeux et le lait maternel au cours des 20 dernières années (Meironyté Guvenius et al., 1999; Norén et Meironyté, 2000; Meironyté Guvenius et al., 2001; Schechter et al., 2003; Fischer et al., 2006). Branchi et al. (2003) a démontré leurs effets neurotoxiques et hormonaux sur des rats et souris de laboratoire.

Les propriétés des POPs et du MeHg entraînent leur bioaccumulation, leur bioconcentration et leur biomagnification le long de la chaîne alimentaire (Corsolini et al., 2005). Les carnivores sont donc les plus contaminés, car ils accumulent les POPs dans leur tissus adipeux et le MeHg dans leurs organes qui ont été absorbés par les strates inférieures (Bonefeld-Jørgensen, 2004). Les salmonidés sont vulnérables à cette bioaccumulation, mais aussi l'homme qui en consomme. Bien que le poisson ne représente qu'une fraction du régime quotidien des populations nord-américaines (environ 10 %), il est la principale source de contamination aux POPs (Alcock et al., 1998; Harrison et al., 1998).

1.2. Contamination chez les salmonidés

Étant donné que les salmonidés se situent au sommet de la chaîne alimentaire marine et que les POPs et le mercure s'accumulent dans les tissus adipeux, l'évaluation de la concentration de ces contaminants dans la chair s'impose. Une étude réalisée par Blanchet et al. (2005) sur le saumon Atlantique et la truite arc-en-ciel de souches sauvages et d'élevage compare leur contamination au mercure, à 14 congénères de BPC et à la sommation des dioxines et furanes. Pour le saumon, 46 spécimens d'élevage et 10 sauvages furent analysés, tandis que 37 individus d'élevage et 10 sauvages ont été testés pour la truite. Aucune différence significative n'a été démontrée entre les souches de saumon pour

la charge en BPC (moyenne 0,01 mg/kg) et pour la somme des dioxines et furanes (0,116 ng NATO-TEQ/kg). Cependant, le mercure était plus élevé chez la souche sauvage (0,056 mg/kg) que chez la souche d'élevage (0,018 mg/kg). Des résultats similaires ont été observés entre les souches de truite avec une moyenne de 0,006 mg/kg pour la somme des BPC et 0,073 ng NATO-TEQ/kg) pour les dioxines et furanes. Les truites d'élevage présentaient une charge en mercure (0,021 mg/kg) significativement inférieure aux truites sauvages (0,045 mg/kg). De plus, 169 substances actives de pesticides ont été investiguées chez les souches de saumon et de truite d'élevage et aucun résidu n'a été détecté.

En 2002, Santé Canada et l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA) ont réalisé une étude sur des souches sauvage et d'élevage de différents produits de la mer, dont le saumon Atlantique et l'omble (Santé Canada et ACIA, 2002). Ces poissons provenaient de Vancouver, Toronto et Halifax. Les saumons (19 d'élevage et 3 sauvages) et les ombles (6 d'élevage et 5 sauvages) ont été analysés pour leur teneur en dioxines, furanes, BPC, EDPB et drogues vétérinaires. Les résultats préliminaires montrent des concentrations en BPC du saumon d'élevage de 0,0175 mg/kg, tandis que le sauvage affiche 0,006 mg/kg. L'omble d'élevage a obtenu des valeurs similaires, soit 0,0065 mg/kg pour la souche d'élevage et 0,0054 mg/kg pour la souche sauvage. Pour les EDPB, le saumon d'élevage a obtenu une moyenne de 0,002 mg/kg et le sauvage, 0,0006 mg/kg. L'omble d'élevage (0,001 mg/kg) et sauvage (0,0006 mg/kg) est encore similaire au saumon. Les poissons avaient donc accumulé des contaminants dans leur chair, mais les concentrations étaient faibles. Santé Canada a donc conclu que la teneur en BPC et en EDPB dans les poissons ne constitue pas un risque pour la santé et qu'il n'y a aucun besoin d'avis spécifiques quant à la consommation du poisson et l'exposition au BPC et aux EDPB.

Le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario (MAAO) a réalisé une étude sur 171 truites arc-en-ciel d'élevage afin de déterminer la charge en POPs et métaux (Cassidy et al., 2002). Les analyses ont démontré des résidus de mercure (n = 59) à des concentrations aussi faibles que 0,01 à 0,07 mg/kg. La concentration moyenne de BPC était de 0,024 mg/kg (n = 63). La TCDD (n = 63) n'a pas été détectée. Des analyses incluant les

dioxines, les furanes et les DLPCB ont démontré une variation entre 0,55 et 4,32 ng-TEQ/kg, ce qui est plus élevé que dans l'étude de Blanchet et al. (2005), où les valeurs étaient plutôt situées entre 0,0002 et 0,175 ng NATO-TEQ/kg. Néanmoins, les valeurs obtenues par le MAAO sont très faibles.

Hites et al. (2004) ont évalué la contamination POPs chez le saumon Atlantique d'élevage et chez les espèces sauvages suivantes (n = 700): saumon du Pacifique keta (*Oncorhynchus keta*), coho (*O. kisutch*), chinook (*O. tshawytscha*), rose (*O. gorbuscha*) et sockeye (*O. nerka*). Un total de 14 contaminants a été analysé (BPCs, dioxines, pesticides organochlorés). Les teneurs en contaminants des saumons d'élevage étaient plus élevées que dans les sauvages, mais toujours sous les valeurs recommandées par Santé Canada et la *Food and Drug Administration* (FDA, États-Unis), comme dans les études mentionnées précédemment. D'autre part, les saumons d'élevage du Chili avaient les valeurs les plus faibles en BPCs, dioxines, toxaphènes et dieldrines. Puisque le saumon chilien est majoritaire dans les marchés québécois (60-90 %) (Blanchet et al., 2005), ces valeurs indiquent qu'un consommateur moyen n'est pas significativement exposé aux POPs. La source de nourriture (poisson frais ou moulée) serait la cause principale des différences significatives entre les souches sauvage et d'élevage selon Hites et al. (2004), mais la comparaison entre deux espèces différentes de saumon peut être discutable du point de vue de la rigueur scientifique. En effet, d'autres facteurs pourraient avoir une influence sur l'accumulation de contaminants, tels la génétique et la physiologie, variables entre les espèces de saumon. En somme, les études présentées démontrent que les salmonidés sont des produits de consommation sans risques majeurs pour la santé humaine.

Pourtant, l'étude de Hites et al. (2004) a entraîné une désinformation médiatique qui a généré, dans l'esprit du consommateur, une peur de la contamination aux POPs par la consommation de poissons d'élevage. En se basant sur les recommandations de la *Environmental Protection Agency* (US-EPA), l'équipe a conclu qu'il était plus risqué pour la santé humaine de consommer du poisson d'élevage par rapport à du poisson sauvage. Ces recommandations sont cependant plus sévères que celles de Santé Canada, la FDA et

l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui sont de 0,1 ppm pour les toxaphènes, 5 ppm pour le DDT, 0,1 ppm pour le mirex, 0,3 ppm pour le chlordane, 2 ppm pour les BPC et 0,5 ppm pour le mercure. Les recommandations pour les agents ignifuges organobromés ne sont pas encore établies par ces organismes. Bien que depuis la situation ait été clarifiée, l'inquiétude est restée chez le public. Afin de palier cette appréhension et aider l'industrie aquacole à promouvoir le poisson d'élevage, les recherches pour produire des salmonidés d'élevage plus « propres » se sont donc multipliées. Une possibilité serait de remplacer l'huile de poisson, la principale source de contamination dans la moulée, par des huiles végétales. Le produit final serait donc moins contaminé en POPs car les huiles végétales sont presque totalement dépourvues de contaminants.

2. Acides gras à longue chaîne polyinsaturés (AGPLC)

2.1. Propriétés des AGPLC

Les acides gras à longue chaîne polyinsaturés entrent dans la composition des huiles végétales et animales. Parmi eux, deux acides gras sont essentiels pour les salmonidés et l'homme: L'acide linoléique 18:2(*n*-6) (LA) et l'acide α -linoléique 18:3(*n*-3) (ALA). Ces acides gras sont dits « essentiels », car ils ne peuvent pas être synthétisés complètement *de novo* à partir de composés non-lipidiques. En effet, les enzymes nécessaires pour la désaturation du 18:1(*n*-9) en LA (Δ 12 désaturase), puis en ALA (Δ 15 désaturase) ne sont pas présentes (Henderson, 1996). Ces AGPLC doivent donc être absorbés via le régime alimentaire.

La bioconversion des acides gras essentiels, par des processus d'élongation et de désaturation via les Δ 6 et Δ 5 désaturases, permet la production de dérivés importants pour l'organisme. Lorsque le LA est présent en quantité suffisante, il entre en compétition avec l'acide oléique 18:1(*n*-9) pour la désaturation par les Δ 6 désaturases, ce qui limite la formation de dérivés *n*-9 au profit de dérivés *n*-6 essentiels à l'organisme. Le LA se convertit en acide γ -linoléique 18:3(*n*-6) (GLA) et en acide dihomogamma-linoléique 20:3(*n*-6) (DGLA), puis en acide arachidonique 20:4(*n*-6) (AA) (Virkkunen et al., 1987). L'ALA entre aussi en compétition avec le LA pour son élongation et sa désaturation. L'organisme

convertit préférentiellement le 18:3(*n*-3), mais cette réaction atteint un plateau selon la concentration initiale de 18:2(*n*-6) qui interfère dans le processus de bioconversion (Greene et Selivonchick, 1987) par les $\Delta 6$ désaturases. L'ALA se converti en acide eicosapentaenoïque 20:5(*n*-3) (AEP) via les élongases et les $\Delta 6$ et $\Delta 5$ désaturases, puis en acide docosahexaenoïque 22:6(*n*-3) (ADH) via les $\Delta 6$ désaturases, les élongases et la β -oxydation peroxysomale (Nakamura et Nara, 2003).

Les *n*-3 et *n*-6 AGLC, plus particulièrement l'AA, l'AEP et le DGLA, sont des précurseurs des eicosanoïdes jouant plusieurs rôles dans l'organisme, notamment en entrant dans la composition des phospholipides membranaires, les leucocytes, les érythrocytes, les neutrophiles, les monocytes, les hépatocytes et les neurones (Simopoulos, 2000; Yehuda et al., 2002). Les AGLC agissent aussi sur la transcription et la transduction de certains gènes (Clarke et Jump, 1994; Graber et al., 1994). L'ADH est l'acide gras structural qui prédomine dans la matière grise, la rétine et les spermatozoïdes des mammifères qui ne peuvent que faiblement le synthétiser (Connor et al., 1991). Les eicosanoïdes produits sont bénéfiques pour l'organisme, entre autres, en réduisant l'inflammation et l'agrégation plaquettaire (Ritter et Taylor, 1988), tout en augmentant la perméabilité membranaire, la transmission des signaux intercellulaires et en prévenant le mauvais cholestérol (Clarke et Jump, 1994). Il est donc fondamental que le régime alimentaire fournisse l'apport nécessaire en AGLC pour subvenir aux besoins de l'organisme.

2.2. Les AGLC et l'homme

Chez l'enfant, l'ADH est essentiel pour le bon développement des capacités cognitives, du système nerveux et de la vision (Dyerberg et al., 1995). Le développement de l'enfant est positivement corrélé avec un apport adéquat en ADH (Boehm et al., 1996). Par ailleurs, un déficit de cet acide gras essentiels entraînerait une mauvaise résistance du système périventriculaire, provoquant des hémorragies, puis la naissance prématurée de l'enfant (Horrocks et Yeo, 1999). Connor et al. (1991) mentionne que si la carence en *n*-3 est bien établie dès l'âge de dix mois, il est peu probable qu'un apport adéquat ne règle complètement les pathologies entraînées par cette déficience en *n*-3. Les patients atteint de

fibrose kystique (Roulet et al., 1997) et de troubles du comportement, comme le déficit d'attention avec hyperactivité (ADHD) (Stevens et al., 1995), démontrent aussi une carence en acides gras essentiels. Ces troubles du comportement sont causés par un déficit en $n-3$ qui entraîne une altération des synapses dans l'hippocampe (Yoshida et al., 1997). Finalement, les enfants qui consomment du poisson régulièrement ont un risque significativement réduit de développer de l'asthme, comparativement aux enfants qui n'en mangent pas (Peat et al., 1992). En effet, les $n-3$ ingérés inhibent la synthèse de leucotriènes (LT), formés à partir de l'AA, qui sont impliqués dans la vasoconstriction des voies respiratoires et la sécrétion excessive du mucus (Dahlen et al., 1981).

Chez l'adulte, l'apport en ADH est essentiel pour le maintien des fonctions du cerveau, par exemple la myélinisation lors de la formation de neurones. Ce processus se poursuit à l'âge adulte, mais à un rythme plus lent que durant l'enfance (Horrocks et Yeo, 1999). Les AGPLC ralentissent le vieillissement du cerveau en maintenant la perméabilité des neurones qui permet à une transmission adéquate des signaux (Yehuda et al., 2002). L'ADH contribuerait aussi à réduire les migraines (Youdim et al., 2000), l'obésité (Awad et al., 2000), le diabète de type II (Nettleton et Katz, 2005), la protéinurie chez les patients atteints de maladies glomérulaires chroniques (De Caterina et al., 1993), l'hypertension et le pourcentage de triacylglycérols et de cholestérol LDL et VLDL dans le sang (Horrocks et Yeo, 1999). Chez les alcooliques, l'agressivité et la dépression secondaire seraient par ailleurs reliées à l'augmentation du ratio $n-6/n-3$ dans le sang causée par une réduction de la synthèse de l'ADH et une augmentation de la synthèse de DGLA (Virkkunen et al., 1987). Les patients souffrant d'Alzheimer et de schizophrénie présentent aussi une carence en ADH (Horrocks et Yeo, 1999), ainsi que les patients atteints de Parkinson (Youdim et al., 2000) et de dyslexie (Richardson, 2004). Le développement du diabète de type I (Nestler et al., 1991) et des maladies cardiovasculaires (Horrocks et Yeo, 1999) est aussi minimisé par la consommation régulière d'ADH. Il contribue également à réduire les symptômes de l'athérosclérose, une des principales causes de maladies coronariennes, en inhibant l'expression de la cytokine qui cause l'inflammation et en réduisant l'adhésion des leucocytes, ce qui limite l'accumulation d'athéromes sur les parois artérielles (De Caterina et al., 1994). De plus, la prolifération des cellules musculaires lisses vasculaires (CMLV)

est ralentie, ce qui réduit l'accumulation de lipides et l'épaississement des parois des grosses artères. Plus précisément, l'ADH agit sur la multiplication cellulaire durant la phase G_1 en bloquant la synthèse d'ADN, ce qui empêche la cellule de passer en phase S, donc de se diviser (Terano et al., 1997). Étant donné que les cellules cancéreuses se multiplient rapidement, l'ADH agit aussi sur ces cellules en inhibant leur prolifération. En revanche, l'AA et le 18:2($n-6$) stimulent la multiplication des cellules cancéreuses (Horrocks et Yeo, 1999).

L'AEP prévient la production de thromboxanes issus de l'AA, ce qui prévient la vasoconstriction, bronchoconstriction et l'agrégation plaquettaire excessives (Ritter et Taylor, 1988; Hirai et al., 1989). L'ADH et l'AEP pourraient aussi aider à prévenir la dépression grave (Hibbeln, 1998). Ils agissent sur le cœur en réduisant la révolution cardiaque et la pression systolique du ventricule gauche. De plus, ils prolongent la conduction de l'influx cardiaque-artériel tout en réduisant sa durée d'émission et en prolongeant la phase de quiescence. En somme, ces mécanismes réduisent les risques de fibrillation du cœur, donc d'infarctus du myocarde. L'ADH serait par contre plus efficace que l'AEP pour prévenir les pathologies cardiaques (McLennan et al., 1996). Enfin, un régime à haute teneur en ADH et en AEP permet de réduire les symptômes des maladies inflammatoires et auto-immunes comme l'arthrite rhumatoïde (Horrocks et Yeo, 1999), le psoriasis (Das et al., 1992), la maladie de Crohn (Belluzzi et al., 1996).

2.3. Consommation recommandée en AGPLC

Étant donné la compétition entre les $n-3$ et les $n-6$ pour les Δ désaturases, la consommation totale d'AGPLC doit être considérée. Le ratio $n-6/n-3$ à respecter maximum de 4:1 chez l'homme (Torstensen et al., 2004). Ce ratio atteint par contre 16,74:1 chez les occidentaux, contrairement au 1:1 chez nos ancêtres chasseurs-cueilleurs (Simopoulos, 2000). Il existe deux causes majeures expliquant le fort ratio $n-6/n-3$ actuel. D'abord selon Crawford (1968), l'agriculture intensive produit de la nourriture de masse, mais de moindre qualité que celle consommée par nos ancêtres. En effet, les animaux de ferme sont nourris en majeure partie avec des grains qui fournissent moins d'acides gras $n-3$ à l'animal et plus de

n-6. Puisque la composition de la chair est influencée par l'alimentation de l'animal, la viande est plus pauvre en *n*-3 chez les animaux d'élevage que chez les animaux sauvages. De même, la composition des produits d'origine animale, les œufs par exemple, suit cette tendance (Simopoulos et Salem Jr., 1992). Simopoulos (1995) avance que les légumes cultivés contiennent moins de *n*-3 que dans la nature. Cette modification du profil en acides gras des aliments influence donc le ratio *n*-6/*n*-3 consommé, mais les habitudes alimentaires entrent aussi en cause. Les occidentaux consomment peu de poisson riche en *n*-3, mais beaucoup de viande animale riche en acides gras saturés et monoinsaturés et de gras *trans* provenant de produits surtransformés.

Il est important de mentionner que les effets de l'ALA et de ses dérivés sont efficaces à long terme (Indu et Ghafoorunissa, 1992), donc il est préférable de changer ses habitudes alimentaires plutôt que de faire un régime aux *n*-3. Il est à noter que la consommation totale d'AEP et d'ADH est primordiale par rapport à l'ALA, car ces acides gras sont plus efficacement incorporés dans le plasma sanguin que l'ALA (Simopoulos, 2000). Puisque l'AEP et l'ADH se retrouvent en grande proportion dans les poissons gras, la consommation quotidienne de poisson devrait être privilégiée. Bien que beaucoup d'efforts soient déployés en recherche afin de produire des œufs (Surai et Sparks, 2001), de la viande (Raes et al., 2004), de la volaille (Lorenz et Van Elswyk, 1997) et du lait (Gulati et al., 2002) dit « oméga-3 », les poissons gras restent, à ce jour, la meilleure source d'AEP et d'ADH (Simopoulos, 2000). Selon Siscovick et al. (1995), une consommation mensuelle de 5,5 g d'oméga-3, c'est-à-dire une portion de poisson gras par semaine, contribue à réduire de 50 % les risques de crises cardiaques. De plus, deux à trois portions de poisson par semaine contribueraient à réduire les risques de mortalité chez les patients ayant survécu à un infarctus du myocarde (Burr et al., 1989). Pour diminuer l'incidence des maladies cardio-vasculaires, l'*American Heart Association* a révisé, en 2000, son guide d'alimentation en prônant la consommation d'oméga-3 ou *n*-3 (ADH et AEP). Elle recommande donc de consommer au moins deux portions de poisson riche en oméga-3 par semaine, comme du saumon, de la truite, du hareng, du thon, du maquereau et des sardines. Par contre, les enfants et les femmes enceintes ou allaitantes devraient limiter leur

consommation de thon frais à un repas par mois, étant donné leur concentration en mercure (*American Heart Association, 2000*).

Les poissons d'eaux froides sont à privilégier, car ils ont une forte proportion en AGLC oméga-3 dans leur organisme, afin d'empêcher la solidification de leurs membranes exposées au froid (Sinclair, 1952). Le degré d'insaturation d'un acide gras agissant sur le point de fusion, plus l'acide gras est insaturé, comme chez les $n-3$, plus le point de fusion est bas. Ainsi, les poissons d'eaux tempérées et chaudes sont plutôt concentrés en AA et en acides gras saturés qu'en ADH et AEP, car leur point de fusion est plus élevé, ce qui empêche une perméabilité excessive des membranes (Karp, 2004).

3. Remplacement de l'huile de poisson par de l'huile végétale dans la moulée

3.1. Les enjeux

Les huiles végétales possèdent plusieurs propriétés permettant de les étudier pour remplacer l'huile de poisson. Moins dispendieuses que cette dernière et plus accessibles, la majorité des huiles végétales sont faibles en gras saturés et monoinsaturés et riches en acides gras polyinsaturés à longue chaîne. Puisque les végétaux sont à la base de la chaîne alimentaire, leurs huiles sont moins concentrées en contaminants organiques et en métaux lourds que les sous-produits à base d'animaux comme les farines et les huiles. En somme, remplacer l'huile de poisson par de l'huile végétale dans la moulée en aquaculture contribuerait au développement durable de l'industrie et à la production de poissons de meilleure qualité et à moindre coût.

Pour réaliser cet objectif, un choix doit être effectué parmi les huiles disponibles sur le marché. Plusieurs études ont été réalisées afin de d'identifier l'huile de remplacement convenant aux besoins nutritionnels des poissons carnivores d'élevage, tout en minimisant l'appauvrissement de la qualité des filets. L'huile d'olive (Buzzi et al., 1996; Torstensen et al., 2004), de palme (Rosenlund et al., 2001; Bell et al., 2002), de lin (Olsen et al., 2000; Rosenlund et al., 2001), de tournesol (Bransden et al., 2003), de soya (Guillou et al., 1995;

Rosenlund et al., 2001; Caballero et al., 2002; Grisdale-Helland et al., 2002) et de canola (Bell et al., 2001; Bell et al., 2003; Torstensen et al., 2004) ont donc été testées. Selon Bell et al. (2002), une huile pouvant potentiellement remplacer l'huile de poisson devrait éviter l'accumulation excessive de 18:2(*n*-6), permettre la rétention de fortes concentrations d'AEP et D'ADH et fournir suffisamment d'énergie sous forme d'acides gras saturés et monoinsaturés pour maintenir une croissance élevée. Selon ces conditions, il semblerait que l'huile de canola et de soya pourraient remplacer l'huile de poisson, mais des études à long terme doivent être réalisées afin d'évaluer la croissance en industrie.

3.2. L'huile d'olive

L'huile d'olive est composée à 71,5 % d'acide oléique, 8,2 % de LA et de 0,7 % d'ALA (Sheppard et al., 1978). Selon Buzzi et al. (1996), le remplacement de 100 % d'huile de poisson par de l'huile d'olive, une huile monoinsaturée riche en acide oléique, pour une période de 120 jours, provoque une augmentation du ratio *n*-6/*n*-3. Il en résulte une diminution du taux de croissance de la truite arc-en-ciel, de même qu'une augmentation de la concentration en *n*-9. L'étude démontre donc qu'un régime déficient en *n*-3 conduit à un changement néfaste du profil en acides gras du poisson. Par contre, une étude de Torstensen et al. (2004) mentionne que le remplacement de 50 % d'huile de poisson par de l'huile d'olive n'influe pas sur le taux de croissance du saumon Atlantique (*Salmo salar*). Les besoins en acides gras essentiels de l'espèce seraient comblés par la proportion de farine de poisson dans la moulée et permettraient d'atteindre les niveaux de *n*-3 requis pour l'animal. Toutefois, les besoins ne sont pas comblés pour la consommation humaine, même si le 18:3(*n*-3) est mobilisé préférentiellement, car il est présent en trop faible proportion dans la ration. L'huile d'olive modifie donc la composition lipidique des filets en augmentant le ratio *n*-6/*n*-3 de façon considérable, surtout parce que les *n*-9 augmentent, ce qui fait baisser la concentration relative de *n*-3. Les saumons analysés à l'issue de l'expérience de 42 semaines de Torstensen et al. (2004) ne démontraient aucune différence significative tant pour le taux de croissance, le pourcentage de mortalité et la digestibilité des lipides. De plus, les acides gras saturés totaux ont été retrouvés en proportion semblable que dans le groupe contrôle. Leur qualité nutritive pour la consommation humaine avait cependant grandement diminuée par rapport au groupe témoin, en raison de la diminution de la

concentration des $n-3$ dans les filets. La concentration d'ADH et d'AEP dans les filets était d'ailleurs la moitié moindre à celle retrouvée chez les poissons nourris à 100 % d'huile de poisson. L'huile d'olive n'est donc pas la source idéale de lipides de remplacement pour les poissons carnivores, d'autant plus qu'elle est dispendieuse par rapport aux autres huiles végétales disponibles sur le marché.

3.3. L'huile de palme

L'huile de palme est une huile saturée riche en acide palmitique (42,0 %) et en acide oléique (37,9 %). Elle contient aussi une faible quantité de LA (9,0 %) et une quantité négligeable d'ALA (0,3 %) (Sheppard et al., 1978). L'étude de Bell et al. (2002), portait sur le remplacement de l'huile de poisson, dans la moulée de saumon Atlantique, par 25 %, 50 % et 100 % d'huile de palme. Au terme des 30 semaines d'expérimentation, aucune différence significative relative à la mortalité, au taux de croissance spécifique et à l'indice de conversion alimentaire (ICA) n'a été constatée entre les traitements. De plus, aucune histopathologie n'a été décelée, que ce soit pour le foie, le cœur ou les muscles. Rosenlund et al. (2001) a obtenu des résultats similaires après 12 mois d'expérimentation sur le saumon Atlantique où l'huile de poisson était remplacée par 50 à 60 % d'huile de palme. Par contre, le profil en acides gras des filets varie, surtout dans les moulées avec 50 % et 100 % d'huile de poisson remplacée par de l'huile de palme. Au-delà de cette limite, la concentration de $n-3$ diminue considérablement, tandis que la concentration d'acides gras saturés totaux (surtout l'acide palmitique), d'acides gras monoinsaturés totaux, de 18:1($n-9$) et de 18:2($n-6$) augmente dans les muscles de façon linéaire avec l'augmentation de l'inclusion d'huile de palme dans la moulée. Le ratio $n-3/n-6$ chute donc de moitié pour la moulée à 50 %. La moulée à 100 % a un ratio 6 fois inférieur à celui de la moulée à 0 % d'huile de palme. Par ailleurs, à plus de 50 % de substitution, l'ADH et l'AEP chutent drastiquement.

En rappelant les conditions de base d'une huile de remplacement de Bell et al. (2002), l'huile de palme provoque une trop forte accumulation de 18:2($n-6$) et une trop faible production de 20:5($n-3$) et de 22:6($n-3$), issus de la bioconversion de l'ALA, pour qu'elle

puisse être un substitut potentiel à l'huile de poisson. En conclusion, l'huile de palme ne serait pas la source d'huile de remplacement la plus avantageuse pour l'industrie, surtout au-delà de 50 % d'inclusion, car elle contribue à augmenter la concentration d'acides gras monoinsaturés et saturés dans la chair, au détriment d'acides gras à longue chaîne polyinsaturés.

3.4. L'huile de lin

L'huile de lin est une huile polyinsaturée *n-3* riche en ALA (67,1 %). Elle contient aussi 13,0 % d'acide oléique et 12,5 % de LA (Nuernberg et al., 2005). Le fort pourcentage de 18:3(*n-3*) rend cette huile très sensible à l'oxydation. Olsen et al. (2000) a réalisé une courte étude de trois semaines sur l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus* L.). Des moules à 0, 5, 10, 15, 16 et 20 % d'huile de lin ont été formulées, où les deux rations à 16 % étaient additionnées de 4 % de 14:0 (acide myristique) ou de 4 % de 16:0 (acide palmitique). Au terme des trois semaines de nourrissage, l'équipe a constaté une augmentation proportionnelle de la présence de gouttelettes de lipides dans les entérocytes par rapport à l'augmentation de l'inclusion d'huile de lin. Bien que mal connu, ce phénomène s'expliquerait par deux principes. D'abord, les acides gras auraient été absorbés trop rapidement pour la capacité de synthèse des lipoprotéines, ce qui expliquerait qu'ils se soient accumulés à l'intérieur des entérocytes de l'épithélium intestinal sous forme de gouttelettes (Deplano et al., 1991). Puisque ce sont majoritairement des *n-3* qui sont absorbés, cela aurait conditionné l'accumulation de gouttelettes (van Greenvenbroek et al., 1995) dû au ralentissement de la synthèse de lipoprotéines. L'antagoniste principal de cette voie métabolique serait la diminution de la concentration de phosphatidylcholine (PC) dans les entérocytes, le lipide polaire majoritairement retrouvé dans la composition des lipoprotéines (Chapman, 1980). Étant donné que l'huile de lin contient une forte proportion de 18:2(*n-6*) et de 18:3(*n-3*) (69 % au total) et une faible proportion d'acides gras saturés (9,8 %), sa composition pourrait indirectement entraîner un ralentissement de production de lipoprotéines et l'accumulation de lipides dans les entérocytes (Rosenlund et al., 2001).

Menoyo et al. (2005) a remplacé 25, 50, 75 et 100 % d'huile de poisson par de l'huile de lin dans la moulée de saumon Atlantique. Après 12 semaines d'expérimentation, la croissance, le facteur de condition physique (CF), l'indice viscéro-somatique (VIS) et l'indice hépatosomatique (HIS) n'ont pas été affectés significativement par la moulée. Cependant, le profil en acides gras des muscles a été influencé par la composition lipidique de la moulée (Rosenlund et al., 2001; Caballero et al., 2002). L'huile de lin a contribué à une plus forte accumulation de $n-6$ et $n-3$ totaux dans les muscles que l'huile de poisson, surtout à 75 et 100 % de remplacement. La majorité des $n-3$ étaient à courte chaîne, donc du $18:3n-3$ (41.6 %), et une plus faible concentration de $n-3$ à longue chaîne (EPA et ADH) a été accumulée par rapport à la moulée contrôle. Ainsi, la qualité du poisson a diminuée significativement, car l'huile de lin a réduit l'accumulation d'acides gras essentiels AGPLC tout en augmentant la concentration de $n-6$. Tocher et al. (2003) a obtenu des résultats similaires avec du saumon Atlantique nourris à des pourcentages variables d'un mélange 1:1 d'huile de lin et de colza (14 à 35 %). Les poissons ont été nourris pendant 2 ans avec les moulées expérimentales du tacon à l'âge adulte (environ 2 kg). Même si la santé générale des poissons n'a pas été affectée, le profil en acides gras du foie, des intestins et des branchies a significativement été modifié par l'huile végétale. La proportion en AGPLC a considérablement diminué, donc la qualité nutritive des poissons a chuté. L'huile de lin, lorsque combinée à une autre huile végétale comme le colza, pourrait donc remplacer l'huile de poisson dans la moulée de salmonidés, mais jusqu'à une certaine limite. Lorsque la majorité de l'huile de poisson est remplacée par de l'huile de lin, le profil en acides gras des muscles est modifié, ce qui altère la qualité du poisson pour la consommation humaine.

3.5. L'huile de tournesol

L'huile de tournesol est polyinsaturée $n-6$ et elle sa composition est très changeante selon plusieurs facteurs environnementaux, comme la variété utilisée, le type de sol et les conditions climatiques durant la phase de croissance de la plante (Robertson, 1972). L'huile extraite au nord des États-Unis contient 66,4 % de LA, 21,7 % d'acide oléique et 0,3 % d'ALA (Sheppard et al., 1978). L'huile de poisson a été remplacée à 0, 4, 10, 20, 40 et 100 % par de l'huile de tournesol dans l'étude de Bransden et al. (2003). Des tacons de *Salmo salar* L. ont été soumis à ce régime durant 63 jours. Bien que le taux de croissance

spécifique n'ait pas été influencé par le régime, des pathologies cardiaques sont apparues et le profil en acides gras des muscles a subi de profondes modifications.

Les $n-3$ totaux affichent une baisse significative de 29,1 et 47,9 % pour 40 et 100 % d'incorporation respectivement. De plus, les concentrations d'ADH et d'AEP ont chuté significativement lorsque 40 % et plus d'huile de poisson était remplacée, ce qui influe considérablement sur les $n-3$ totaux. Ces modifications agissent sur le ratio $n-3/n-6$ qui passe de 9,0 à 1,9 (régime à 40 %) et 0,7 % (régime à 100 %) après seulement 63 jours d'expérimentation. Étant donné que l'huile de tournesol est riche en $n-6$ et que la composition de la moulée reflète la composition des filets (Grisdale-Helland et al., 2002), l'augmentation de l'utilisation de cette huile entraîne un accroissement considérable de la concentration des $n-6$ totaux, donc une baisse du ratio $n-3/n-6$. Les $n-6$ totaux, surtout le 18:2($n-6$), augmentent de plus de 70 % à partir de 40 % d'incorporation.

Puisque selon Bell et al. (2002), une huile de remplacement doit limiter la déposition excessive de 18:2($n-6$), l'huile de tournesol ne peut pas être retenue pour remplacer l'huile de poisson dans la moulée de salmonidés, car elle ne respecte pas cette condition. De plus, elle ne permet pas de maintenir les niveaux recommandés de $n-3$ et entraîne des pathologies cardiaques et une immunosuppression face au stress (Bell et al., 1993, Bell et al., 1996).

3.6. L'huile de soya

L'huile de soya est une huile polyinsaturée $n-6$ riche en LA (53,0 %) et en acide oléique (22,0 %) (Sheppard et al., 1978). Elle contient aussi 7,1 % d'ALA et 11,2 % d'acide palmitique, donc son profil pourrait permettre de respecter les trois conditions de Bell et al. (2002) pour une huile de remplacement. Plusieurs études ont été réalisées afin de substituer complètement ou partiellement l'huile de poisson par de l'huile de soya (Hardy et al., 1987; Greene et Selivonchick, 1990; Deplano et al., 1991; Guillou et al., 1995; Caballero et al., 2002; Grisdale-Helland et al., 2002; Robin et al., 2003). Les résultats sont relativement semblables entre les études : les indicateurs de condition physique tels que le taux de croissance spécifique, le pourcentage de mortalité, l'indice hépato-somatique, l'indice

viscéro-somatique et la présence ou non d'histopathologies n'étaient pas influencés de façon significative par la composition lipidique de la moulée. Deplano et al. (1991) explique la présence de gouttelettes de lipides dans les entérocytes par une accumulation temporaire de lipides pour la synthèse des lipoprotéines. Selon Caballero et al. (2002), cette accumulation permet au LA d'être ensuite mobilisé pour être stocké dans les muscles sous forme de phospholipides grâce aux acyltransférases. Les vacuoles lipidiques des hépatocytes accumulent donc peu de lipides, car l'utilisation du 18:2(*n*-6) serait assez efficace pour éviter ce phénomène. En effet, le 18:2(*n*-6) serait mobilisé rapidement pour d'être absorbé par le foie, puis estérifié dans les muscles où il se concentre (Henderson, 1996).

Le profil en acides gras des poissons nourris avec 50 % et 100 % d'huile de soya démontre une augmentation de 68 et 80 % respectivement de la concentration de 18:2(*n*-6) dans les filets, par rapport au groupe contrôle. Ce changement provoque une baisse de *n*-3/*n*-6, d'abord que l'apport en *n*-3 est réduit par rapport à celui provenant de l'huile de poisson, ensuite parce que la bioconversion des *n*-3 diminue avec l'augmentation d'incorporation d'huile de soya (Grisdale-Helland et al., 2002). L'AEP et l'ADH chutent de 55 % et 30 % respectivement, même si le précurseur pour la bioconversion de ces acides gras, le 18:3(*n*-3), est présent. La bioconversion du 18:3(*n*-3), en AEP puis en ADH, atteindrait donc un plateau où l'addition d'ALA ne modifierait en rien la capacité maximale de production d'AEP et d'ADH (Greene et Selivonchick, 1990). Ce plateau pourrait être engendré par une compétition entre le 18:2(*n*-6) et le 18:3(*n*-3) pour la $\Delta 6$ désaturase. Le LA bloquerait donc l'action de l'ALA sur l'enzyme, l'empêchant de se convertir en AEP et en ADH (Greene et Selivonchick, 1987).

Enfin, la proportion de gras saturés totaux n'a pas significativement augmenté, ce qui est positif, car une trop forte concentration de ces gras dans la chair diminue la concentration de *n*-3 bénéfiques pour le consommateur. L'huile de soya pourrait donc rencontrer les exigences nutritives pour les poissons et pour la consommation humaine, mais des études à long terme devront être réalisées afin d'évaluer l'impact commercial de la substitution de l'huile de poisson par l'huile de soya. En effet, la plupart des études ont été effectuées à

moyen terme (Hardy et al., 1987; Greene et Selivonchick, 1990; Caballero et al., 2002; Grisdale-Helland et al., 2002), période beaucoup trop courte pour constater des changements physiologiques qui se manifesteraient plutôt à long terme. De plus, certaines études n'ont remplacé qu'un faible pourcentage de l'huile de poisson (Guillou et al., 1995; Robin et al., 2003), ce qui n'est pas représentatif du but de l'industrie, à savoir remplacer au maximum l'huile de poisson, pour réduire les coûts de production.

3.7. L'huile de canola

Une des huiles les plus appropriée au remplacement de l'huile de poisson serait l'huile de canola. Avec le soja, le canola est l'oléagineuse la plus cultivée au Canada. Sa production rapporte plus de 6 milliards de dollars à l'industrie canadienne annuellement (Canola Council of Canada, 2005). Elle est donc accessible et peu coûteuse. Cette huile monoinsaturée est composée à 53,2 % de 18:1(*n*-9), 22,2 % de 18:2(*n*-6) et 11,0 % de 18:3(*n*-3) (Sheppard et al., 1978). Ses proportions en acides gras monoinsaturés lui confèrent une résistance à la β -oxydation. Le 18:1(*n*-9) est considéré comme le meilleur substrat pour la production d'énergie chez le saumon (Torstensen et al., 2004), ce qui ajoute de l'intérêt pour l'utilisation du canola qui en contient abondamment. Plusieurs études ont été réalisées avec des concentrations variant de 0 à 100 % d'incorporation d'huile de canola (Bell et al., 2001; Bell et al., 2003; Torstensen et al., 2004). Ces études notent que le taux de croissance spécifique ne varie pas significativement, de même que le pourcentage de survie et la condition physique du poisson (Bell et al., 2003; Torstensen et al., 2004). Cependant, le ratio *n*-3/*n*-6 chute de plus de 70 % lorsque plus de 50 % d'huile de canola remplace l'huile de poisson dans la moulée (Bell et al., 2003). Cette variation s'explique par une hausse substantielle de la concentration de 18:2(*n*-6) dans les filets. Cependant, l'augmentation de 75 % de 18:3(*n*-3) n'entraîne pas nécessairement un accroissement de la production de 20:5(*n*-3) et de 22:6(*n*-3). De plus, une hausse de production de 20:4(*n*-6) n'a pas été constatée. Il semblerait que la compétition entre le LA et l'ALA pour les $\Delta 6$ désaturases empêche le 18:3(*n*-3) d'être converti en AEP et en ADH, tout en prévenant une surproduction d'acide arachidonique à partir du 18:2(*n*-6) (Greene et Selivonchick, 1987). L'AA est reconnu pour causer des problèmes cardiaques si trop concentré et son

pourcentage diminue avec l'augmentation de l'incorporation d'huile de canola dans la ration (Bell et al., 2001).

Les études de Bell et al. (2003) et Bell et al. (2001) démontrent que les gras saturés totaux, en particulier le 16:0, connaissent une baisse importante à plus de 50 % d'inclusion d'huile de canola. Cette baisse se fait préférentiellement au profit d'AGPLC, toutefois, le 18:2(*n*-6) se retrouve en trop grande proportion par rapport au 18:3(*n*-3), car il induit une forte compétition pour la bioconversion par la Δ 6 désaturase. De ce fait, le 18:2(*n*-6) limite la production d'AEP et d'ADH par le 18:3(*n*-3) (Bell et al., 1993). Une alternative à cette compétition serait d'ajouter à la moulée de l'ADH préformé qui serait directement absorbé dans les muscles. Une période de finition avec une moulée à 100 % d'huile de poisson pourrait aussi rétablir les niveaux d'acides gras essentiels.

3.8. Réduction de la bioaccumulation des POPs par les huiles végétales

Une étude de Berntssen et al. (2005) sur le saumon Atlantique a été réalisée sur 22 mois afin de comparer l'accumulation des POPs chez les poissons nourris soit avec de la moulée à 100 % d'huile de poisson, soit à 100 % d'un mélange d'huiles végétales (55 % d'huile de canola, 30 % d'huile de palme et 15 % d'huile de lin). Leurs résultats démontrent une réduction significative des dibenzo-*p*-dioxines et dibenzofuranes (PCDD/F), ainsi que des DLPCB chez les groupes nourris avec de l'huile végétale. Cependant, les ratios *n*-3/*n*-6 ont négativement été affectés, ce qui démontre l'insuffisance des huiles végétales pour maintenir les bons niveaux d'acides gras. Bell et al. (2005) a tenté de répondre à ce problème en incluant une période de finition à leur étude de croissance. Des saumons Atlantique ont donc été nourris avec des moulées avec 17 % et 35 % d'huile de poisson remplacée par un mélange 1:1 d'huile de canola et de lin. La période de croissance d'une durée de 115 semaines a été suivie d'une période de finition de 24 semaines avec une moulée à 35 % d'huile de poisson. L'accumulation de dioxines et de DLPCB était plus élevée chez les poissons nourris avec de l'huile de poisson. Durant la période de finition, les poissons préalablement nourris avec de l'huile végétale ont rapidement accumulés des contaminants, mais les concentrations sont restées inférieures à celles présentes chez le groupe nourris avec de l'huile de poisson. En 24 semaines de finition, les niveaux d'AEP et

d'ADH ont été rétablis à 80 % de leur concentration initiale, tandis que la charge en POPs est demeurée moindre que chez le groupe témoin. Ces résultats démontrent que les huiles végétales représentent une alternative intéressante pour réduire l'exposition aux POPs et que la période de finition est primordiale afin de produire du poisson de qualité. Cependant, puisque les niveaux d'acides gras hautement bénéfiques pour le consommateur n'ont pas totalement été rétablis, il serait intéressant de combiner une moulée à base d'huile végétale à une source élevée en ADH, tel le *Schizochytrium* sp., une algue marine produite industriellement en milieu contrôlé.

4. Manipulation des ratios protéines/énergie

L'optimisation de l'utilisation des protéines retrouvées dans les moulées commerciales permet d'améliorer la croissance des poissons d'élevage. Puisque les poissons tirent en partie leur énergie des protéines, en ajoutant des nutriments énergétiques non protéiniques, tels des lipides, les poissons pourraient métaboliser de l'énergie des lipides plutôt que des protéines. De ce fait, l'accumulation de protéines serait augmentée, améliorant ainsi la croissance. Par contre, ce concept est plausible seulement si l'apport en protéines est en excès des besoins par rapport à la ration de référence.

4.1. Croissance et efficacité alimentaire (EFAci)

Plusieurs études ont démontré que des sources d'énergie non protéiniques peuvent efficacement fournir l'énergie nécessaire au métabolisme du poisson, ce qui permet de rediriger les acides aminés vers la croissance de la truite arc-en-ciel (Ruohonen et al., 1998; Steffens et al., 1999) et du saumon Atlantique (Hillestad et Johnsen, 1994; Einen et Roem, 1997; Grisdale-Helland et Helland, 1997; Helland et Grisdale-Helland, 1998).

Dans une étude sur des juvéniles de quatre espèces de salmonidés élevées en eau douce, Azevedo et al. (2004) a évalué quatre moulées expérimentales isoenergétiques (énergie digestible = 20 MJ/kg). Ces moulées ont été formulées avec des ratios PD/ED de 24, 22, 20 et 18 g/MJ, en réduisant le pourcentage de protéines digestibles (de 53 à 39 %) et en augmentant le pourcentage de lipides (de 19 à 26 %). Les espèces de salmonidés

expérimentales sont les saumons Atlantique et chinook, la truite arc-en-ciel et l'omble de fontaine. À l'intérieur d'une espèce, le gain de poids ne varie pas selon le ratio PD/ED, mais l'efficacité alimentaire (EFAci) diminue avec la diminution du ratio PD/ED. Lorsque l'effet de la croissance sur l'utilisation de l'azote et de l'énergie par le poisson est évalué, l'EFAci diminue, peu importe la diète expérimentale utilisée. Lanari et al. (1995) a aussi noté une augmentation de la croissance de la truite arc-en-ciel et de l'EFAci avec l'augmentation du ratio DP/DE (de 16 à 18 g/MJ). Avec du saumon Atlantique nourris avec des moulées contenant de 47 à 57 % de protéines et de 21 à 24 MJ/kg d'énergie digestible, Helland et Grisdale-Helland (1998) n'ont observé aucune différence significative dans la croissance et l'EFAci des poissons. En opposition, avec du saumon Atlantique (poids initial = 100g; poids final = 600 g), Hillestad et Johnsen (1994) ont noté une augmentation de la croissance et une augmentation de l'EFAci avec la diminution du pourcentage de protéines dans la moulée. Leurs moulées comprenaient de 35 à 42 % de protéines et de 21 à 32 % de lipides (énergie brute = de 21 à 24 MJ/kg). Les saumons de cette expérience auraient donc répondu adéquatement à l'énergie disponible dans la moulée, sans tenir compte du pourcentage de protéines pouvant leur fournir cette énergie.

4.2. Rétention d'azote digestible (DNRE) et rétention d'énergie digestible (DERE)

Le ratio protéines digestibles/ énergie digestible (PD/ED) de la moulée peut donc être modifié pour répondre aux critères de production et aux critères environnementaux concernant les rejets piscicoles. Entre autres, le ratio PD/ED d'une moulée influence le rejet d'azote (N) dans l'environnement, car il agit sur sa rétention dans le poisson (Azevedo et al., 2004). Selon Azevedo et al. (2004), la DNRE augmente linéairement avec la diminution du ratio PD/ED. Avec la croissance de l'omble de fontaine et du saumon Atlantique, la DNRE a aussi diminué, mais peu importe la diète expérimentale utilisée. Par contre, Lanari et al. (1995) a remarqué une rétention d'N plus élevée lorsque le ratio DP/DE était plus élevé dans la moulée. Steffens et al. (1999) a réalisé une étude de 64 jours sur des truites arc-en-ciel de 92.4g. Deux moulées expérimentales ont été testées, soit la moulée 1 avec 47 % de protéines et 13 % de lipides (19 MJ/kg) et la moulée 2 avec 48 % de protéines et 24 % de lipides (24 MJ/kg). À la suite de l'expérimentation, le poids final des poissons était similaire (250-265 g), donc la croissance n'a pas été affectée par la moulée. Cependant,

l'EFACi a été inférieure et l'efficacité d'utilisation des protéines a été supérieure pour la moulée 2. L'amélioration de l'utilisation des protéines dans cette moulée a entraîné une diminution d'excrétion d'azote. De plus, l'utilisation de l'énergie était plus élevée lorsque les poissons étaient nourris avec la moulée plus élevée en énergie digestible.

Une étude de Krogdahl et al. (2004) démontre que l'efficacité de rétention d'N digestible (DNRE) et l'efficacité de rétention d'énergie digestible (DERE) ne diffèrent pas entre le saumon Atlantique et la truite arc-en-ciel d'âge semblable, nourris dans des conditions semblables avec la même moulée. D'autres études démontrent que cette rétention diffère selon les espèces (Berg et Bremset, 1998; Rasmussen et Ostefeld, 2000; Reftie et al., 2000). De plus, les études de Ronsholdt (1995) et Einen and Roem (1997) démontrent une influence significative de la taille sur la DNRE, la DERE et l'EFACi. L'influence de l'espèce sur l'utilisation des nutriments et de l'énergie doit donc être approfondie, ainsi que l'effet du ratio PD/ED sur la croissance et la qualité du poisson, mais la manipulation du ratio PD/ED dans la moulée de salmonidés reste une option intéressante à considérer pour optimiser la production.

5. Le *Schizochytrium* sp. comme source d'ADH

5.1. Présentation du *Schizochytrium* sp.

Avec les récentes découvertes en pharmacologie et en alimentation, plusieurs sources d'ADH ont été identifiées afin de compléter les produits de consommation humaine. Parmi les sources unicellulaires, les huiles de dinoflagellés et de protistes connaissent un essor fructueux, notamment en remplaçant les huiles de poisson dans les formulations pour enfants, un marché d'environ 10 milliards de dollars par année. Chez les microalgues marines utilisées commercialement, *Thraustochytrium* sp., *Cryptocodinium* sp. et *Schizochytrium* sp. sont des sources riches en ADH (Ward et Singh, 2005). *Schizochytrium* sp. a été retenu pour l'étude grâce à sa forte concentration en ADH (44 g/100 g acides gras totaux), sa biodisponibilité industrielle, sa simplicité d'utilisation, sa grande stabilité dans la moulée et sa digestibilité élevée. De plus, elle ne produit pas de toxines et ne contient pas de contaminants dans les lignées industrielles. La recherche et le développement effectués

pour réduire les coûts de production à grande échelle permettent la fabrication d'un produit de qualité contribuant au développement durable de l'aquaculture (Barclay et al., 1998). Son procédé de fabrication industrielle a été développé par Barclay (1992) et permet une production rapide et abondante de cellules riches en ADH.

Les moules et les palourdes se nourrissent naturellement de *Schizochytrium* sp. (Hammond et al., 2002). Ces algues entrent donc dans l'alimentation de l'homme lorsqu'il consomme ces mollusques, ou indirectement via la chaîne alimentaire marine. Parmi les aliments contenant de l'huile de *Schizochytrium* sp., on compte les suppléments alimentaires pour adultes, les formulations pour mère enceintes et allaitantes, les produits laitiers, les vinaigrettes et les céréales (Ward et Singh, 2005). Toutefois, ces huiles sont très sensibles à l'oxydation et ne peuvent pas être incorporées directement dans les aliments. Elles doivent d'abord être incorporées dans des microcapsules, puis dans l'aliment.

Lorsque séchées par atomisation (*spray dried*), les microalgues forment des agrégats, ou biomasses, de 50 à 150 μ , destinées à l'industrie de l'aquaculture (Ward et Singh, 2005). Elles servent alors pour l'enrichissement d'artémies et de rotifères destinés à nourrir les larves de crevette et de poisson (Barclay et Zeller, 1996). Plusieurs études visent à remplacer partiellement ou totalement les algues vivantes pour des microalgues séchées dans la culture de moules (Langdon et Önal, 1999), de palourdes et d'huîtres (Boeing, 1997). Les résultats concluent à une bonne adaptation au nouveau régime, ainsi qu'un taux de croissance spécifique similaire qu'avec des algues conventionnelles (Langdon et Önal, 1999). Elles peuvent aussi enrichir en ADH le poulet et les oeufs (Abril et Barclay, 1998), sans qu'il n'y ait d'effet organoleptique indésirable. De plus, chez les monogastriques, l'ADH est plus efficacement incorporé dans les muscles que lorsqu'ils sont nourris avec du lin, car leur métabolisme convertit difficilement l'ALA en AEP puis en ADH (Abril et al., 2003). Enfin, des études démontrent que le *Schizochytrium* n'est ni pathogène, ni toxique (Ward et Singh, 2005) et n'a pas tendance à muter à travers ses multiplications (Hammond et al., 2002).

5.2. Synthèse d'ADH

Le *Schizochytrium* n'emprunte pas la voie de biosynthèse de l'ADH utilisée par les autres organismes eucaryotes. Selon Ratledge (2004), au lieu de former des acides gras 16:0 via une cascade de réactions dans le complexe FAS (*fatty acid synthase*) pour ensuite les élonger et les désaturer en AGPLC (figure 1), il semblerait que ce protiste utilise plutôt une PKS (*bacterial-like polyketide synthase*) (figure 2).

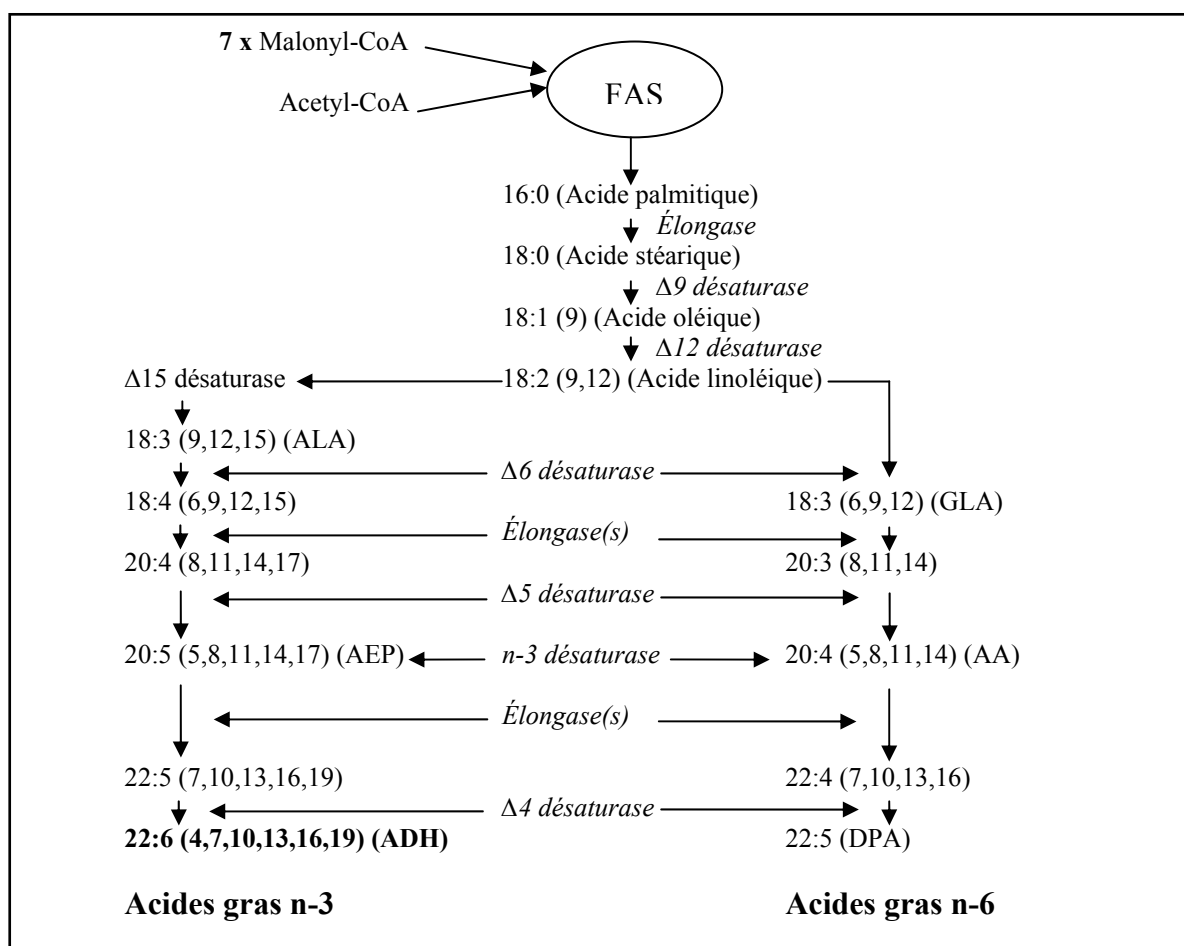


Figure 1. Formation d'AGPLC chez les microorganismes, via la voie conventionnelle de la FAS. ALA : Acide α -linoléique; ADH : Acide docosahexaénoïque; AEP : Acide eicosapentaénoïque; DPA : Acide docosapentaénoïque; AA : Acide arachidonique; GLA : Acide γ -linoléique. Adapté de Ratledge (2004).

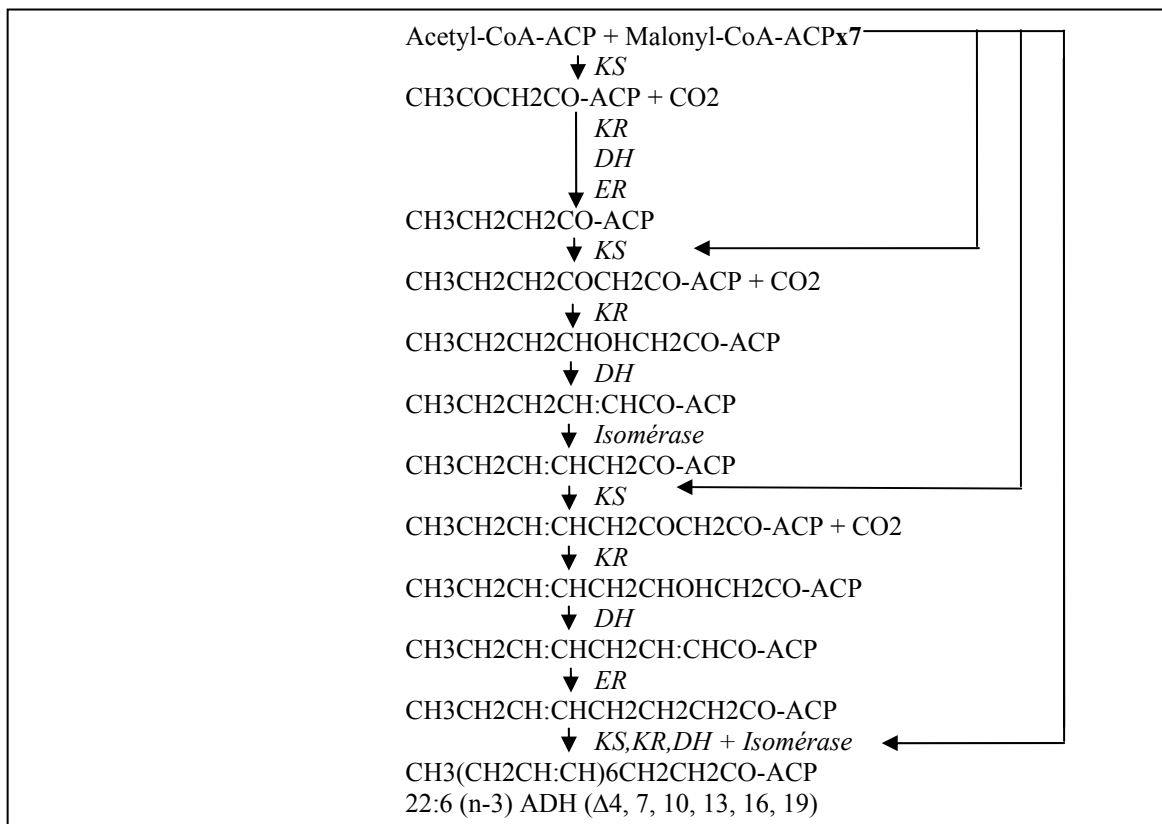


Figure 2. Voie suggérée de la PKS utilisée par *Schizochytrium* sp. pour la fabrication d'ADH. DH : déhydratase/isomérase; ER : enoyl réductase; KR : 3-ketoacyl-ACP réductase; KS : 3-ketoacyl synthase. Adaptation de Ratledge (2004).

Comme la voie de la FAS, la voie de la PKS utilise l'acetyl-CoA et le malonyl-CoA pour débiter la formation du 16:0 et du 18:0. Cependant, la PKS n'emprunte pas la voie de désaturation pour la fabrication d'AGPLC. Dans la FAS, la désaturation implique l'utilisation d'oxygène pour la formation de doubles liens, mais la voie du PKS serait anaérobie car elle se réalise sans oxygène. Les microalgues du genre *Schizochytrium* sont donc fondamentalement différentes des autres eucaryotes, car elles fabriquent leurs acides gras en mode anaérobie.

Puisque la description de la voie de la PKS est assez récente (Ratledge, 2004), elle est encore fortement révisée et corrigée. Dans la voie de la FAS, les intermédiaires insaturés ne sont pas stables et doivent être transformés sous forme saturée avant de passer à une autre étape d'élongation. L'utilisation de désaturases et élongases est donc justifiée, mais la

cellule consomme beaucoup d'énergie pour fabriquer le produit final. En revanche, lors de la formation d'AGPLC via la PKS, les intermédiaires insaturés sont stables et peuvent conserver leur conformation entre les étapes. Ce système permet donc de réduire l'utilisation de NADPH, servant à fournir de l'énergie à la cellule pour la fabrication des AGPLC, via le cycle de Krebs. En somme, l'organisme économise son énergie en réduisant sa consommation de NADPH : lors de la production d'un acide gras saturé, puis lors de sa désaturation en AGPLC (Ratledge, 2004). Le fonctionnement de la stabilité des intermédiaires insaturés n'est cependant pas encore bien identifié.

6. Période de finition ou « wash-out »

6.1. Rétablir les niveaux adéquats d'AEP et d'ADH

Avec le remplacement de l'huile de poisson par l'huile végétale, les niveaux de $n-3$, plus particulièrement d'AEP et d'ADH, diminuent durant la période de croissance, ce qui réduit la qualité des filets (Bell et al., 2001; Bell et al., 2003; Bransden et al., 2003; Buzzi et al., 1996; Menoyo et al., 2005; Rosenlund et al., 2001; Tocher et al., 2003; Torstensen et al., 2004). Puisque les poissons convertissent difficilement l'acide linoléique en AEP et en ADH, ces acides gras essentiels doivent être présents dans la moulée afin de rencontrer les besoins des poissons. Or, ces acides gras ne se retrouvent pas dans les huiles végétales, mais il est possible de compléter l'engraissement avec une période de finition, ou « wash-out », à base d'huile de poisson. Cette étape de production vise à rétablir le ratio $n-6/n-3$ bénéfique pour la consommation humaine. Puisque la finition s'effectue pendant un courte période de temps, l'utilisation totale d'huile de poisson pour la production de filets de qualité et à coût moindre est significativement réduite. La durée de la période de finition dépend de celle de la période de croissance avec l'huile végétale, du pourcentage d'huile de poisson substitué, de l'espèce et des conditions d'élevage.

6.2. Des études optimistes

Peu d'études ont été réalisées concernant l'effet d'une période de finition sur le rétablissement des niveaux adéquats d'acides gras. Entre autres, des études ont été effectuées sur le turbot (*Psetta maxima*) (Regost et al., 2003), le saumon Atlantique (Bell

et al., 2003, Torstensen et al., 2004) et la dorade royale (*Sparus aurata*) (Izquierdo et al., 2005). Izquierdo et al. (2005), a réalisé une expérience où l'huile de poisson était remplacée à 60 % et 80 % par de l'huile de soya, de lin ou de canola. La période de finition a duré 90 jours, ce qui équivaut à 44 % de la période de croissance de 204 jours. En 294 jours, les poissons ont atteint leur taille de revente, donc la finition a permis de comparer l'effet de la durée de cette période sur le rétablissement du ratio $n-6/n-3$ chez des poissons de taille commerciale. Après 90 jours, les niveaux d'ALA et d'AEP ne se sont pas rétablis complètement surtout pour l'ALA, ce qui diminue la qualité du poisson. L'auteur ne mentionne pas les changements survenus au niveau des acides gras saturés et monoinsaturés. Par contre, l'ADH et l'AA se sont rétablis en 60 jours, ce qui représente seulement 29 % de la période de croissance. La différence entre l'accumulation d'AEP et d'ADH dans les muscles peut être expliquée par deux théories. D'abord, l'AEP pourrait être préférentiellement oxydé dans les muscles, étant donné que cet acide gras a considérablement diminué durant la phase de croissance et qu'il s'est lentement rétablit, contrairement au ADH. La β -oxydation mitochondriale de l'AEP serait donc la voie dominante sur la β -oxydation peroxisomale de l'ADH, se qui expliquerait que l'AEP ne s'est pas rétablit, même après 90 jours de finition (Froyland et al., 2000). Ensuite, l'incorporation de l'AEP dans la phosphatidylcholine (PC) et dans la phosphatidylethanolamine (PE) serait fortement influencée par la présence d'ADH qui possède une forte affinité avec ces composés lipidiques. Conséquemment, une hausse de la consommation d'ADH inhiberait l'incorporation d'AEP dans la PE et une hausse d'AEP augmenterait l'incorporation de l'ADH dans la PC et la PE (Izquierdo et al., 2000). Lors de la période de finition de 90 jours, une augmentation d'apport en AEP et ADH, via l'huile de poisson, contribuerait donc à rétablir les niveaux d'ADH sans toutefois que l'AEP ne se rétablisse totalement. En fournissant constamment de l'AEP et de l'ADH pendant la période de croissance, en proportions similaires à celles retrouvées dans l'huile de poisson, les niveaux de ces acides gras essentiels pourraient être préservés, même avec l'utilisation d'huile végétale dans la moulée. La période de finition serait donc minimisée, réduisant par le fait même l'utilisation d'huile de poisson pour la production. Comme mentionné précédemment, la biomasse de *Schizochytrium* sp. contient un fort pourcentage en ADH, ce qui en fait une bonne candidate pour son utilisation pendant la croissance.

Une autre étude à long terme a été effectuée par Torstensen et al. (2004) sur le saumon Atlantique. La période de finition représentait 60 % de la période de croissance de 42 semaines. L'étude visait à remplacer de 25 à 100 % d'huile de poisson par de l'huile de canola ou d'olive. Le ratio $n-6/n-3$ s'est rétabli après la période de finition, ainsi que les niveaux d'AEP et d'ADH. Cependant, l'objectif d'une période de finition est d'être la plus courte possible tout en rétablissant les pourcentages d'AGPLC. Dans cette étude, la finition comptait pour plus de la moitié de la période de croissance, donc l'utilisation d'huile de poisson n'a pas été significativement minimisée. La formulation des moulées et le procédé d'élevage doivent être révisés afin d'optimiser le remplacement d'huile de poisson par l'huile végétale. Les études concluent donc que la période de finition serait une solution envisageable afin de rétablir les niveaux d'AEP et d'ADH bénéfiques pour la consommation humaine, mais les recherches doivent être poursuivies. Pour l'instant, le poisson n'arrive pas à compenser suffisamment la perte de ces acides gras lors de la croissance.

En conclusion, l'aquaculture est une industrie en pleine croissance qui doit composer avec des obstacles à son développement. La peur d'exposition aux POPs et aux métaux lourds par la consommation de poisson et l'augmentation des coûts de production liés aux fluctuations des prix de l'huile de poisson en sont quelques exemples. En remplaçant l'huile de poisson par de l'huile végétale, les coûts de production et la bioaccumulation des POPs peuvent être réduits, car ces huiles sont très abordables et non contaminées. Cependant, leur concentration en acides gras bénéfiques pour la santé humaine est moindre que dans les huiles de poisson, particulièrement pour l'AEP et l'ADH qui sont absents, ce qui diminue la qualité des filets. En ajoutant une source élevée en ADH dans la moulée à base d'huile végétale, comme le *Schizochytrium* sp., l'apport en ADH pourrait être maintenu. La variation de concentration en acides gras essentiels serait donc minimisée par rapport à une moulée à 100 % d'huile de poisson. De plus, la modification de la technique d'élevage, par l'incorporation d'une courte période de finition suite à la croissance, permettrait aux niveaux d'AGPLC d'être significativement rétablis afin que le produit final soit de haute qualité et abordable pour le consommateur. Des études de digestibilité du *Schizochytrium* sp. chez les salmonidés doivent d'abord être effectués. Puis, une étude à long terme avec

une alternance d'une période de croissance et d'une finition devrait être réalisée sur des salmonidés. Dans cette expérience, les poissons seraient nourris avec des moulées à base d'huile de soya et de canola, combinées à du *Schizochytrium* sp., afin de déterminer la croissance, la condition et le profil en acides gras.

Le projet de maîtrise présenté regroupe les expériences de digestibilité, de croissance et de finition proposées. Ces expériences ont été effectuées sur la truite arc-en-ciel (*Onchorhynchus mykiss*). Les hypothèses initiales pour ce projet de maîtrise sont donc :

1. Pour la digestibilité du *Schizochytrium* sp., nous prévoyons que cet ingrédient sera hautement digestible, et ce invariablement à la température de l'eau, donc un bon candidat pour être ajouté à la moulée de truite arc-en-ciel d'élevage;
2. Durant la période de croissance, le remplacement de 75 % d'huile de poisson par de l'huile végétale et l'altération des ratios protéines digestibles / énergie digestible (PD/ED) dans la moulée permettra de réduire significativement l'accumulation de POPs dans les filets, tout en n'influençant pas la survie, la croissance, ni la qualité des filets;
3. Durant la période de finition, la concentration de POPs dans les filets restera inférieure à celles rencontrées chez les groupes témoins et les niveaux d'acides gras bénéfiques pour la consommation humaine seront rétablis.

Les objectifs de cette maîtrise sont donc :

1. De développer des moulées isoénergétiques, pour la truite arc-en-ciel, où l'huile de poisson sera remplacée partiellement par de l'huile végétale et où différents ratios PD/ED seront utilisés ;

2. De déterminer la digestibilité du *Schizochytrium* sp., une source marine élevée en ADH, par une étude de digestibilité ;
3. De réaliser une étude de croissance à long terme ;
4. De déterminer l'effet d'une courte période de finition sur la qualité du poisson;
5. D'effectuer une courte étude économique sur les coûts de production des moulées expérimentales.

CHAPITRE 2
DIGESTIBILITY OF *SCHIZOCHYTRIUM* SP. IN RAINBOW TROUT
(*ONCORHYNCHUS MYKISS*) FEED: AN APPROACH TO FISH OIL
REPLACEMENT

RÉSUMÉ

Avec la diminution de la disponibilité de l'huile de poisson pour l'aquaculture, cette étude évalue la possibilité d'incorporer une algue marine, riche en acides gras polyinsaturés à longue chaîne (AGPLC), dans la moulée de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). La digestibilité du *Schizochytrium* sp. a été évaluée à deux températures (8 et 15 °C). Aucune différence significative n'a été observée entre les températures pour les coefficients de digestibilité apparente (ADC) de la matière sèche (94.3 ± 4.9 %), des lipides totaux (85.8 ± 0.0 %), des protéines (89.5 ± 1.8 %), de l'énergie (83.1 ± 1.7 %) et des acides gras. De plus, l'ADC des nutriments, de l'énergie et des acides gras était élevée, ce qui démontre que le *Schizochytrium* sp. est un supplément en AGPLC de haute qualité qui pourrait compléter la moulée à base d'huile végétale, trop faible en acides gras bénéfiques pour maintenir leur niveaux dans les filets.

ABSTRACT

With continuously decreasing fish oil availability for use in aquaculture, this investigation was completed to determine whether an alternative marine source, rich in long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA), could be used effectively by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) when supplied to the diet. *Schizochytrium* sp. algal biomass was used in digestibility trials at two different temperatures, 8 and 15 °C. No significant difference was observed between temperatures for the apparent digestibility coefficients (ADC) of dry matter (94.3 ± 4.9 %), total lipid (85.8 ± 0.0 %), crude proteins (89.5 ± 1.8 %), energy (83.1 ± 1.7 %) and fatty acids. Moreover, ADC of nutrients, energy and fatty acids were of great importance, showing that *Schizochytrium* sp. is a high-quality candidate as a supplement of LC-PUFA in fish feed with vegetable oils where the percentage of these beneficial fatty acids is too low to maintain muscle fatty acid composition.

AVANT-PROPOS

Contribution de l'élève à la rédaction de l'article:

Ma contribution pour cet article a été l'élaboration du protocole de recherche, la gestion du projet et des manipulations de laboratoire. J'ai personnellement veillé au suivi du protocole, à l'avancement des analyses de laboratoire et j'ai dirigé les étudiants d'été. Je suis l'auteure principale, car j'ai effectué la recherche dans la littérature, les analyses statistiques et la rédaction de l'article.

Renseignement sur les co-auteurs :

Grant Vandenberg, Ph.D. (Université Laval)¹

Pierre Ayotte, Ph.D. (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Janice L. Bailey, Ph.D. (CRBR - Université Laval)¹

Dominique Bureau, Ph.D. (University of Guelph)³

Yvan Chouinard, Ph.D. (Université Laval)¹

Éric Dewailly, Ph.D. (Faculté de Médecine - Université Laval)⁴

Alain Leblanc, chimiste (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Jean-Philippe Weber, Ph.D. (Toxicologie humaine, INSPQ)²

¹Département des Sciences Animales, Pavillon Paul-Comtois, Université Laval, Québec, QC, G1K 7P4

²Toxicologie humaine, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

³Fish Nutrition Research Laboratory, Department of Animal and Poultry Science, University of Guelph, Guelph, ON, N1G 2W1

⁴Risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

Cet article sera soumis à l'hiver 2008.

1. Introduction

Fish farming has developed, in just a few decades, into a fast-growing, productive and efficient industry. Given that consumer demand for fish products are predicted to grow and that increased supplies can only come from aquaculture (FAO, 2000), productivity will continue in the trend of rapid-growth. To sustain this production, supplies of high-energy lipid-rich feed must accompany the demand. However, availability of fish oil and fish meal, major components of the feed, is becoming a concern due to the overexploitation of wild fish stocks (FAO, 2000). Vegetable oils have been proposed to partly substitute for fish oil, because of their vast accessibility and low cost (Bimbo, 1990). Also, a number of studies have shown that they can significantly replace fish oil in salmonids feed without affecting survival, growth and feed efficiency (Bell et al., 2001; Rosenlund et al., 2001; Caballero et al., 2002). The inclusion of high percentage of vegetable oils in feed, however, influence the muscle fatty acid composition in fish, lowering the concentration of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA) such as docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA), well known for their beneficial cardiovascular and cognitive properties to humans who consume the fish (Horrocks et Yeo, 1999).

Schizochytrium sp. is an algal biomass that contains 18-22 % of DHA by weight (Advanced BioNutrition, Columbia, MD). We suppose that addition of this ingredient in vegetable oil-based fish feeds will maintain the levels of DHA and EPA in the flesh of farmed salmonids. Prior to a growth study, the present experience was realized to determine the digestibility of *Schizochytrium* sp., when added to regular feed, and given to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). The digestibility trial was performed at two water temperatures (8 °C and 15 °C) to evaluate the changes in digestibility when fish are exposed to the minimum and maximum they can support without having their normal growth affected (NRC, 1993). We predict that *Schizochytrium* sp. will have a high digestibility, without regards of the temperature.

2. Materials and methods

2.1 Feeds

To determine the digestibility of algal biomass (*Schizochytrium* sp.), two feeds were used: one reference feed based on requirements for rainbow trout (NRC, 1993) and one with 30 % of algae replacing the reference feed (Cho, 1982) (Table 1). *Schizochytrium* sp. was used as the algal biomass (Advanced BioNutrition, Columbia, MD). Sipernat 50TM (Jefo Nutrition Inc., Saint-Hyacinthe, QC) was included as an inert marker for determination of apparent digestibility coefficients (ADC) for fatty acids and other nutrients (protein, lipid, energy). Pellets were prepared with a California Pellet Mill (model CPM CL-5, California Laboratory Pellet Mill Co., Crawfordsville, IN) using a 4 mm die, dried under forced air at room temperature for 24h and then sieved.

2.2 Fish and feeding

Prior to the digestibility trial, rainbow trout with an average of 146.4 ± 4.1 g were randomly allocated in twelve 60 L rectangular tanks in a fresh water recirculating system at the *Laboratoire de Recherche en Sciences Aquatiques* of *Université Laval* (Quebec, QC). Tanks were filled with 17 fish to reach approximately 42 kg/m^2 biomass per tank. As the system was designed to collect feces from a group of three tanks, feeds were randomly assigned to each group. Digestibility was performed at two temperatures, first at $8 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, than at $15 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. These temperatures represent the minimum and maximum the fish could support without affecting their normal growth (NRC, 1993). Environmental parameters remained within limits recommended for rainbow trout by the National Research Council (NRC, 1993).

Prior to the beginning of each trial, fish were acclimated three days to the feed and temperature. Fish were hand-fed until apparent satiation twice daily (9:00 and 16:00). For nine days, feces were collected via a modified Guelph system based on Cho et al. (1982) twice a day, before each meal and were stored at $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ until the end of the trial.

Afterwards, samples were thawed in a refrigerator at 4 °C, centrifuged to remove excess water and freeze-dried for seven days prior to analysis to determine apparent digestibility coefficients (ADC) for the nutrients and energy of test and reference diets, according to Cho et al. (1982):

$$\text{ADC} = 1 - (F / D \times D_i / F_i)$$

Where: D = % nutrient (or kJ/g gross energy) of diet; F = % nutrient (or kJ/g gross energy) of feces; D_i = % digestion indicator (AIA) of diet; F_i = % digestion indicator (AIA) of feces.

Determination of apparent digestibility of the algae ingredients (ADC) was performed by using Sugiura et al. (1998) :

$$\text{ADC}_i = \text{ADC}_T + ((1 - s) D_R / s D_I) (\text{ADC}_T - \text{ADC}_R)$$

Where: ADC_i = apparent digestibility coefficient of test ingredient; ADC_T = apparent digestibility coefficient of test diet; ADC_R = apparent digestibility coefficient of reference diet; D_R = % nutrient (or kJ/g gross energy) of reference diet; D_I = % nutrient (or kJ/g gross energy) of test ingredient; D_T = % nutrient (or kJ/g gross energy) of test diet; s = proportion of test ingredient in test diet (i.e., 0.3 in this study); 1-s = proportion of reference diet in test diet (i.e., 0.7 in this study).

All aspects of the trial were approved by the *Comité de Protection des Animaux de l'Université Laval*.

2.3 Chemical composition

Feeds and feces were analysed for dry matter, ash, crude protein, total lipid, gross energy and fatty acid profile (Table 2). Dry matter was obtained by drying samples to constant weight in a forced air oven at 105 °C overnight. Sample weight was recorded before and after drying, followed by cooling in a desiccator. Dry matter was expressed as a percentage of wet weight (AOAC, 1990). Ash content was obtained by dry ashing in porcelain crucibles in a muffle furnace at 500°C overnight and expressed in dry weight (AOAC, 1990). Gross energy was performed by bomb calorimetry (Parr Instrument Company Inc., Moline, IL) and calculated as a percentage of dry matter. Crude protein was evaluated using a LECO (model FP-2000; LECO Corporation, St-Joseph, MI), and nitrogen (N) conversion factor of N x 6.25, expressed as dry weight.

Total lipid was performed with a Soxhlet HT-TECATOR[®] extractor (Soxtec System HT12, Foss Tecator AB; Hoganas, Sweden), the solvent being diethyl ether at 100 °C. Prior to the extraction, 1 % of BHT was added to prevent oxidation of fatty acids, as the samples were used to determine fatty acid profiles. Total lipids were expressed as dry weight. Samples were blown dry under nitrogen to prevent oxidation. For the feces, acid hydrolysis was done before the lipid extraction and the fatty acid analysis (Kremen et al., 1954; Lambert et al., 1954; Lease et al., 1938; Longenecker and Mattil, 1942; Lyman, 1917; Lynch et al., 1963; Machlin et al., 1959). To determine the fatty acid composition of diets and feces, the AOAC FAME procedure (AOAC, 2000) was used. Samples were analysed on a GC FID gas chromatograph from Hewlett-Packard model 5890 series II (Palo Alto, CA) equipped with a CP-Sil 88 capillary column (100 m x 0.25 mm). Oven temperature was held at 80 °C for 1 min before being raised to 215 °C (2 °C min⁻¹) for 30 min and maintained for 98 min. Injector temperature was 220 °C and detector temperature was 230 °C. Fatty acid peaks were identified, quantified and the gas chromatograph calibrated using pure methyl ester standards (Nu Chek Prep; Elysian, MN). Individual components were identified by comparing area under the curve with the ChemStation Rev: A 10.01 program (Agilent Technologies; Santa Clara, CA).

2.4 Statistical analysis

Digestibility of *Schizochytrium* sp. in test diet was analysed for significant differences between replicates and temperatures by performing a one-way analysis of variance (ANOVA). The factorial parameter was the temperature (2) and the experimental unit, the replicate (2). Values are in percentages, so were arcsin transformed before ANOVA. Normality was evaluated with Kolmogorov-Smirnov test and differences between means were evaluated for significant differences with Tukey's multiple range test. Analyses were performed with SAS 8.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC). Statistical significance was accepted at a probability value of $p < 0.05$.

3. Results

3.1 Apparent digestibility of nutrients and gross energy

No significant differences were detected between temperatures for ADC of dry matter (overall mean \pm S.D., 94.3 ± 7.8 %), total lipid (85.8 ± 3.9 %), crude protein (89.5 ± 1.7 %) and energy (83.1 ± 2.7 %) for *Schizochytrium* sp. (Table 2).

3.2 Apparent digestibility of fatty acids

No significant differences among ADC of saturated fatty acids (SFA) were seen (Table 2). Mean total SFA apparent digestibility coefficient was 70.6 ± 6.0 %. ADC for each SFA was of 76.0 ± 7.4 % for 14:0, 69.3 ± 7.1 % for 16:0 and 57.0 ± 10.4 % for 18:0. No significant differences were detected for total MUFA (90.4 ± 4.4 %), nor for 16:1 (92.9 ± 3.2 %), 18:1 n -9 (88.2 ± 5.7 %) and 24:1 (69.3 ± 10.5 %).

Moreover, ADC for 22:5 n -6 (total n -6) was not significantly different between temperatures and mean value was 98.7 ± 0.7 %. Total n -3 fatty acids (98.3 ± 0.4 %) had no significant difference in digestibility, as well as 18:3 n -3 fatty acid (82.2 ± 10.2 %) and 20:5 n -3 (98.6 ± 0.7 %). However, 22:6 n -3 was significantly higher at 8 °C than at 15 °C (p

< 0.05). Furthermore, ADC for total polyunsaturated fatty acids (PUFA) (98.5 ± 0.3 %) had no significant difference among temperatures.

4. Discussion

4.1 *Apparent digestibility according to water temperature*

According to our results, for rainbow trout, digestibility of nutrients does not respond to variation of temperature, in a range of 8 °C to 15 °C (Table 2). In a study with rainbow trout at 7, 11 and 15 °C, Windell et al. (1978) found no significant difference between digestibility of dry matter, protein, lipid and energy, for fish of sizes 207 g and 586 g. Cho and Slinger (1979), with rainbow trout (37 to 113 g) at 9, 12, 15 and 18 °C, found no differences over the range from 9 to 15 °C. ADC was slightly higher at 18 °C, because the basal metabolic rate was increased at this temperature (Cho and Kaushik, 1990). Moreover, no effect of water temperature on the ADC of a practical reference diet in rainbow trout, at 9, 12, 15 and 18 °C was detected (Cho and Kaushik, 1990). Our present results at 18 °C are in opposition with Cho and Slinger (1979), but support our results at lower temperatures. When lard and tallow were fed to rainbow trout, apparent digestibility was higher when temperature was raised (Cho and Kaushik, 1990), however, ADC for fish, rapeseed, soybean and linseed oils was not significantly different, supporting our results for lipid ADC. Cho and Kaushik (1990) conclude that lard and tallow should therefore be avoided as a source of lipid in diets for cold-water fish.

Lipid digestibility was not influenced by water temperature and fatty acid digestibility should correspond. With an exception of 22:6 n -3 fatty acid, SFA, MUFA, PUFA, n -3, n -6, even n -3/ n -6 ratio fatty acids did not significantly vary with a change in temperature (Table 2). Ng et al. (2003) showed that a decrease in temperature, from 15 to 7 °C, does not significantly reduce total monoenes and PUFA apparent digestibility. We can therefore conclude that nutrient, energy and fatty acid digestibility was not affected by water temperature for rainbow trout, within the species' range of normal growth.

4.2 Digestibility of *Schizochytrium*

Nutrients of *Schizochytrium* sp. are highly digestible in rainbow trout feed (Table 2). Dry matter is highly digestible and is in accordance with results from Olsen et al. (2004) with digestibility of *Calanus finmarchicus* in Atlantic salmon (*Salmo salar*) of 500 g held at 10 °C seawater. ADC of dry matter was 95.0 ± 0.3 % while our results are of 94.3 ± 7.8 %. Cho and Kaushik (1990) had a mean ADC of 92 % for crude protein, and Windell et al. (1978) reported an ADC between 92 and 95 % for 37 to 113 g rainbow trout. Our results are therefore in agreement with these previous studies and stands in the range described by the NRC (1993), where digestibility for fish usually varies in a range of 75 to 95 %. In multiple digestibility trials with rainbow trout using feather meal, meat and bone meal, poultry by-product meal, and blood meal, Bureau et al. (1999) observed a digestibility between 68 and 99 % for gross energy. Also, Cho and Kaushik (1990) reported an average of 76 %. The algal biomass has also a high digestibility for gross energy, with a mean of 83.1 ± 2.7 %. In a study with rainbow trout (initial weight 250 g) at 11.9 ± 0.4 °C, Caballero et al. (2002) obtained a lipid apparent digestibility between 79.2 and 92.5 %. Our results are supported by this study and by Cho and Kaushik (1990), Cho and Slinger (1979), Windell et al., (1978) and Cho et al. (1974) were lipid ADC was in a range of 80 % to 93 %.

Digestibility of SFA from the algal biomass varies in the range formerly detected, between 60 and 99 % (Caballero et al., 2002; Olsen, 2004). In a trial with Atlantic salmon fed varying levels of n-3 and SFA, Menoyo et al. (2003) reported an ADC for total SFA in this range. Caballero et al. (2002) observed an ADC for total MUFA of 90.2 to 95.2 % and Olsen et al. (2004) was between 93.5 and 96.0 %. Our total MUFA digestibility at 8 °C is slightly under the digestibilities reported by these authors (87.4 ± 4.8 %), while ADC at 15 °C stands in the range. Total n-3 and n-6 fatty acid have an extremely high ADC, nearly 100 %. These results are in accordance with previous studies, where the range was between 93 and 99 % (Caballero et al., 2002; Menoyo, 2003; Olsen, 2004). Our results follow the path of Sigurgisladottir et al. (1992), Johnsen et al. (2000) and Ng et al. (2004), where the

apparent digestibility of fatty acids decreases with increasing chain length, but increases with increasing insaturation. According to Sigurgisladottir et al. (1992), variations in ADC of an individual fatty acid are in part due to its melting point, digestibility being lower when the melting point is higher. Preferential absorption of PUFA, compared to MUFA and SFA by rainbow trout is in agreement with previous studies on fatty acid digestibility of rainbow trout (Caballero et al., 2002, Ng et al., 2003) and Atlantic salmon (Johnsen et al., 2000). ADC of total PUFA shows that *Schizochytrium* sp. is a high-quality candidate as a substitute of LC-PUFA from fish oil when the last is replaced by vegetable oils in the feed.

5. Conclusion

The aim of the present study was to determine the digestibility of *Schizochytrium* sp., a marine source of LC-PUFA, at two different temperatures. Our results verified our hypothesis that this algal biomass is highly digestible for rainbow trout. Furthermore, a blend of this LC-PUFA marine source can be mixed with a high percentage of vegetable oils in the feed to determine the influence of the diets on percent survival, growth performance, feed efficiency, and particularly, maintenance of flesh quality and muscle fatty acid composition.

Acknowledgments

We thank AquaNet, EWOS inc. (Surrey, BC), *La Société de Recherche et de Développement en Aquaculture Continentale* inc. (SORDAC) (Quebec, QC), *La Société de Développement de l'Industrie Maricole* inc. (SODIM) (Gaspé, QC), *Le Réseau Aquaculture Québec* (RAQ) (Rimouski, QC), Bi-Pro Marketing Ltd. (Guelph, ON) and the Canola Council of Canada (Winnipeg, MB) for financial support. Advanced BioNutrition (Columbia, MD) kindly provided the algal biomass. The technical assistance of B. Bullis, B. Chabot, A. Desmeules, G. Dagenais, O. Fecteau, S. Houle, F. Giguère, M. Gingras, N. Gruyer, R. Gervais, É. Laurin, É. Proulx, R. Prince, and J.-C. Therrien is acknowledged.

Tables

Table 1
Feed components (g/kg DM) of experimental diets and chemical composition of *Schizochytrium* sp.

	Feed	
	Reference diet	Algae diet
Ingredient composition		
Fish meal	30.0	21.0
Corn gluten meal	17.0	11.9
Wheat middlings	16.3	11.4
Soybean meal	12.9	9.1
Whey	10.0	7.0
Vitamin/mineral premix ¹	0.5	0.4
Fish oil, herring	11.2	7.9
Sipernat 50 TM	2.0	1.4
<i>Schizochytrium</i> sp. biomass	0.0	30.0
	<i>Schizochytrium</i> sp.	
Chemical composition	g/100 g DM	
Dry matter (g/kg)	97.0	
Crude protein	15.5	
Total lipid	43.0	
Ash	9.4	
Gross energy (MJ/kg DM)	28.8	

DM, Dry matter.

¹Salmonid vitamin/trace mineral premix from Corey (Fredericton, NB).

Table 2

Fatty acid profile and chemical composition of feed and apparent digestibility coefficients (ADC) of *Schizochytrium* sp. when replacing 30 % of a reference diet and fed to rainbow trout nine days, at two water temperatures, 8 and 15 °C (mean \pm SD, n = 2).

	Feed		ADC			
	RD	AD	8 °C		15 °C	
	g/100 g TFA		g/100g TL			
Fatty acid						
14:0	6.7	7.4	77.0 \pm 11.6	75.6 \pm 2.7		
16:0	21.8	23.3	70.8 \pm 10.6	68.7 \pm 3.6		
18:0	4.0	2.0	49.9 \pm 11.0	64.8 \pm 3.7		
Total SFA ¹	40.9	36.8	77.4 \pm 8.8	70.6 \pm 3.4		
16:1	6.0	2.6	90.7 \pm 3.3	95.3 \pm 0.2		
18:1 n -9	11.9	4.9	84.4 \pm 6.7	92.0 \pm 0.6		
24:1	0.5	0.3	63.6 \pm 14.4	75.4 \pm 3.8		
Total MUFA	22.8	9.2	87.5 \pm 5.2	92.1 \pm 0.5		
22:5 n -6	2.4	11.1	99.3 \pm 0.3	98.2 \pm 0.1		
Total n -6	2.4	11.1	99.3 \pm 0.3	98.2 \pm 0.1		
18:3 n -3	2.5	1.1	75.8 \pm 12.8	88.7 \pm 1.3		
20:5 n -3	12.3	6.8	98.4 \pm 1.2	98.7 \pm 0.1		
22:6 n -3	17.5	33.7	99.1 \pm 0.1 ^b	98.5 \pm 0.1 ^a		
Total n -3	32.6	41.9	98.4 \pm 0.7	98.6 \pm 0.1		
Total PUFA	35.0	53.0	98.7 \pm 0.5	98.5 \pm 0.1		
n -3/ n -6	13.4	3.8	. \pm .	. \pm .		
Chemical composition			g/100 g DM			
Dry matter (g/kg)	93.4	95.6	97.8 \pm 1.2	90.8 \pm 11.5		
Crude protein	42.0	34.6	88.2 \pm 1.2	90.8 \pm 0.7		
Total lipid	17.7	27.0	85.8 \pm 5.1	85.9 \pm 4.4		
Ash	10.0	9.7	. \pm .	. \pm .		
Gross energy (MJ/kg DM)	22.7	24.1	81.9 \pm 2.6	84.3 \pm 3.1		

Data represent the mean \pm standard deviation of duplicates. Values with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

RD, reference diet; AD, algal diet (experimental diet); ADC, apparent digestibility coefficient of algae biomass; DM, dry matter; TFA, total fatty acid; TL, Total lipid; SFA, saturated fatty acid; MUFA, monounsaturated acid; PUFA, polyunsaturated fatty acid.

¹ Total SFA includes 15:0, 17:0, 20:0, 22:0 and 24:0.

CHAPITRE 3
VEGETABLE OILS AS SUSTAINABLE FISH OIL SUBSTITUTES IN
RAINBOW TROUT DIETS: AN APPROACH TO REDUCE
CONTAMINANT EXPOSURE AND FEED COSTS

RÉSUMÉ

L'huile de poisson totale (FO) a été remplacée et les ratios protéines digestibles/énergie digestible (DP/DE) ont été modifiés dans la moulée de truite arc-en-ciel afin de réduire l'accumulation de contaminants et les coûts de production. Les ratios 18 et 25 DP/DE ont été combinés à de l'huile de soya (SO), de canola (CO) et un mélange de canola et de *Schizochytrium* sp. (COS). Les huiles et les ratios DP/DE n'ont pas modifié la digestibilité apparente, la croissance, la flaveur et les paramètres somatiques. Cependant, les ratios $n-3/n-6$ ont diminué pendant la croissance. Une courte période de finition a restauré les niveaux $n-3/n-6$ pour les groupes CO et COS, indépendamment du ratio DP/DE, mais pas chez les groupes SO. Les polluants organiques persistants (POPs) ont diminué, peu importe le ratio DP/DE. Par rapport aux rations à base de FO, l'utilisation de SO et CO a diminué le coût des rations de 31% pour les traitements 18 DP/DE et de plus de 14% pour les traitements 25 DP/DE. En somme, les moulées 25 CO et COS, combinées à une finition, sont les moulées rencontrant au mieux nos objectifs.

ABSTRACT

The aim of this study was to replace 75% of total fish oil (FO) and alter digestible protein/digestible energy (DP/DE) in rainbow trout feeds to minimise contaminants exposure and feed costs. 18 and 25 DP/DE ratios were combined with soybean (SO), canola (CO) and a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. (COS). Dietary lipids and DP/DE ratios did not affect apparent digestibility, growth, somatic and sensory parameters. However, $n-3/n-6$ levels decreased significantly in the growth trial, especially for the SO groups. A short wash-out trial restored $n-3/n-6$ levels for the CO and COS groups, irrespective of the DP/DE ratio, but not for the SO groups. Persistent organic pollutants (POPs) were lowered, regardless of the DP/DE ratio. When compared to FO-based feeds, utilization of SO and CO reduced feed costs by 31% for the 18 DP/DE treatments and more than 14% for the 25 DP/DE treatments. In sum, the 25 CO and COS diets, with a wash-out period, were the most effective feeds for rainbow trout.

AVANT-PROPOS

Contribution de l'élève à la rédaction de l'article:

Ma contribution pour cet article a été l'élaboration du protocole de recherche, la gestion du projet et des manipulations de laboratoire. J'ai personnellement veillé au suivi du protocole, à l'avancement des analyses de laboratoire et j'ai dirigé les étudiants d'été. Je suis l'auteure principale, car j'ai effectué la recherche dans la littérature, les analyses statistiques et la rédaction de l'article.

Renseignement sur les co-auteurs :

Grant Vandenberg, Ph.D. (Université Laval)¹

Pierre Ayotte, Ph.D. (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Janice L. Bailey, Ph.D. (CRBR - Université Laval)¹

Dominique Bureau, Ph.D. (University of Guelph)³

Yvan Chouinard, Ph.D. (Université Laval)¹

Éric Dewailly, Ph.D. (Faculté de Médecine - Université Laval)⁴

Alain Leblanc, chimiste (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Jean-Philippe Weber, Ph.D. (Toxicologie humaine, INSPQ)²

¹Département des Sciences Animales, Pavillon Paul-Comtois, Université Laval, Québec, QC, G1K 7P4

²Toxicologie humaine, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

³Fish Nutrition Research Laboratory, Department of Animal and Poultry Science, University of Guelph, Guelph, ON, N1G 2W1

⁴Risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

Cet article sera soumis à l'hiver 2008.

1. Introduction

According to the FAO (2007), wild fish stocks from the oceans have reached their maximum potential of exploitation, while inland resources are overexploited. Given that consumer demand for fish products are predicted to grow and they can only come from aquaculture, this industry will continue to expand, by an average 8.8 % per year (FAO, 2007). For rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) only, 504 876 tonnes (1 687 630 USD) were produced in 2004, representing an increase of 138 % since 1994 (FAO, 2004). Wild fish by-products such as oil and meal are used in aquaculture feeds and the use of fish oil as percentage of the diet has increased in the past decades to produce fast-growing high-quality fish for human consumption. To sustain this fish production, supplies of high-energy lipid-rich aquaculture feed must be available. However, supplies of fish oil and fish meal, major components of the aquaculture feed, are a concern due to the overexploitation of wild fish stocks (FAO, 2007).

As persistent organic pollutants (POPs) and heavy metals, such as mercury, have been reported in salmonids fed commercial feeds (Hites et al., 2004), and given public concern related to these contaminants, efforts must be directed towards reducing contaminant levels in farmed fish. While consumption of fish only represent an average of 10 % of North-American diets, 90 % of the exposure to POPs come from ingesting fish products (Alcock et al., 1998; Harrison et al., 1998). A significant reduction in levels of dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/F), as well as dioxin-like polychlorinated biphenyls (DLPCB) were observed for Atlantic salmon fed 100 % of a blend of vegetable oils, but the desirable *n*-3/*n*-6 ratio in fillets also declined (Berntssen et al., 2005).

To reduce the reliance on fish oils and address contaminant issues, efforts can be directed on reducing fish oil percentage in the feed by partially replacing it with vegetable oils. Also, altering protein/lipid ratios in the feed, without modifying digestible energy, can be evaluated as a mean to reduce the content of lipid-soluble contaminants.

Vegetable oils have been studied to partly substitute fish oil, because of their accessibility and low cost (Bimbo, 1990). A number of studies have shown they can replace a significant percentage of fish oil in salmonids feed without affecting survival, growth and feed efficiency (Bell et al., 2001; Rosenlund et al., 2001; Caballero et al., 2002). However, vegetable oils have a different fatty acid profile than fish oils. When included in high percentages in feed, they influence flesh fatty acid composition and reduce the concentration of omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA) such as docosahexaenoic acid (DHA) and eicosapentaenoic acid (EPA), well-known for their cardiovascular and cognitive properties (Horrocks et Yeo, 1999).

Protein utilisation can also be optimised to improve the growth of farmed fish. As fish derive energy from proteins, lipids and, to a lesser extent, carbohydrates, replacing proteins in the feed by lipids can enhance lipid use for energy requirements. This strategy spares amino acids from being used for energy and improves growth. Studies have shown that proteins can effectively be replaced by other nutrients for energy requirements of rainbow trout (Ruohonen et al., 1998; Steffens et al., 1999) and Atlantic salmon (Hillestad and Johnsen, 1994; Einen and Roem, 1997; Grisdale-Helland and Helland, 1997; Helland and Grisdale-Helland, 1998).

Strategies to restore the levels of beneficial fatty acids (LC-PUFA) in farmed fish flesh include a wash-out period following the growth period and the use of algal concentrates high in LC-PUFA. Studies were carried out to determine the relevance of using a wash-out feed containing 100 % fish oil to restore beneficial fatty acid levels with gilthead seabream (*Sparus aurata*) (Izquierdo et al., 2005), Atlantic salmon (*Salmo salar*) (Bell et al., 2003; Torstensen et al., 2004) and turbot (*Psetta maxima*) (Regost et al., 2003). Although promising, no study was able to sufficiently restore the LC-PUFA levels in the flesh because fish have a limited capacity of producing these fatty acids. However, by feeding vegetable oil-feeds combined with a high LC-PUFA source (*Schizochytrium* sp.), we hypothesize that initial LC-PUFA levels will be maintained so the wash-out period could be shorter than in previous studies.

Bell et al. (2005) concluded that replacing fish oil in the aquaculture feed by vegetable oils (ratio of 1:1 canola and linseed oils) plus a wash-out period is efficient in reducing contaminant exposure to persistent organic pollutants (POPs) in Atlantic salmon. Once more, vegetable oils are excellent-quality candidates to use in fish feed because of their low POPs and mercury concentrations, but further investigation must be done to maintain beneficial LC-PUFA levels in the fillets.

The aim of this study was to determine the influence on flesh contaminant loading and fatty acid profiles, when replacing 75 % of total fish oil with a blend of vegetable oils and a high LC-PUFA algal source (*Schizochytrium* sp.), and altering of digestible protein/digestible energy (DP/DE) in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feeds. A growth trial (9 months) was followed by a wash-out trial (3 months) to compare the exposure to POPs and mercury, while evaluating the restoration of fatty acid profiles. A short economic analysis evaluated the sustainability of experimental diets the in the industry. During the growth period, we predict that replacing fish oil with vegetable oils and modifying protein/lipid levels in fish feed will result in significantly lower contaminant levels in the flesh, while maximizing the utilisation of lipids as a source of energy. For the wash-out period, we predict that feeding fish with a finishing feed containing high levels of long-chain highly-unsaturated fatty acids (LC-HUFA) will permit restoration of these beneficial components in the flesh.

2. Materials and methods

2.1 Fish and feeding

Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) weighting 43.6 ± 1.0 g at the beginning of growth trial were randomly allocated in 24 tanks of 340 L in a fresh water flow through system at Alma Aquaculture Research Station (AARS) in Elora (ON). Photoperiod was set as a 12/12 light/dark cycle. Tanks were stocked with 45 fish per tank in order not to exceed a density of 60 kg/m^3 per tank at the end of the trial, based on known growth rates. Each diet was

assigned to three replicate tanks ($n = 3$) in a completely randomized block design to limit any environmental effects resulting from lighting intensity or floor traffic.

Prior to the beginning of growth trial, fish were acclimated for two weeks. On a weekly basis, they were hand-fed until apparent satiation two days, then at 75 % satiation the next five days with belt feeders, twice a day. Size of pellets varied according to fish body size, from 3 to 6 mm (NRC, 1993).

All aspects of the trial were approved by the *Comité de Protection des Animaux de l'Université Laval*.

2.2 Feeds

2.2.1 Growth trial

To determine the impact of replacing 75 % of total fish oil by alternate lipids sources in the feed, the 10.8 % fish oil content in the herring oil was considered in the calculations of total fish oil (Soxhlet method, section 2.4). Isoenergetic diets were formulated according to the NRC requirements for rainbow trout (1993). Two digestible protein/digestible energy ratios (18 and 25 DP/DE), based on those employed by Azevedo et al. (2005), were combined with four sources of lipids. The lipid sources were herring oil, soybean oil, canola oil, and a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. biomass (Table 3). The following diets were formulated; 18 FO, 18 DP/DE with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE with 75 % of a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 25 FO, 25 DP/DE with 100 % fish oil; 25 SO, 25 DP/DE with 75 % soybean oil; 25 CO, 25 DP/DE with 75 % canola oil; 25 COS, 25 DP/DE with 75 % of a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. Algae biomass was added to balance LC-PUFA concentration in fish oil.

Herring oil was purchased from Corey Aquafeeds (Fredericton, NB), soybean oil from Soya Excel (Beloeil, QC) and canola oil from Bunge (Montreal, QC). *Schizochytrium* sp. (S-Type Gold Fat) was supplied by Advanced BioNutrition (Columbia, MD). All dry ingredients were mixed, after which the mixture was blended with either fish oil or a blend of fish oil and the alternate source of lipid (10 % of total oil was saved for coating). Pellets were steam pelleted with a California Pellet Mill (model CPM CL-5, California Laboratory Pellet Mill Co., Crawfordsville, IN), dried under forced air at room temperature for 24h and then sieved. Diets were then coated with 10 % of appropriate oil.

2.2.2 Wash-out period

To restore beneficial LC-HUFA levels in fillets, fish oil-based diets were fed for a three-month wash-out period. During this period, fish were fed diets containing 100 % fish oil (Table 3).

2.3 *Sampling procedures and evaluation of growth parameters*

2.3.1 Growth trial

Fish were weighed at the beginning of the experiment, and then every 28 days. At time 0 (beginning of the experiment), 15 fish were removed from the initial population. After, 5 fish per tank were sampled every 3 months, at time 3 (84 days), 6 (168 days), and 9 (252 days). At each sampling event, fish were overdosed with tricaine methanesulphonate (MS-222). Body, heart, liver, viscera, and gonads (if they were in a maturing state) were weighed. Fork length was measured and color was evaluated with a SalmoFanTM. Each fillet was taken from the carcass, skin removed and stored in a Ziploc bag at -20 °C for further analysis.

The effects on growth were determined by evaluating growth performance indices, such as weight gain, thermal growth-unit coefficient (TGC), feed conversion ratio (FCR) and survival percentage. Somatic parameters including condition factor (CF) and hepatosomatic index (HIS) were also calculated using the following formulae (Caballero et al., 2002):

$$CF = 100 \times \text{body weight} / \text{length at fork}^3$$

$$HIS = 100 \times \text{liver weight} / \text{body weight}$$

$$FCR = \text{Feed intake} / \text{weight gain}$$

$$TGC = 100 \times (\text{final body weight}^{1/3} - \text{initial body weight}^{1/3}) / (\text{temperature} \times \text{days})$$

2.3.2 Wash-out period

Five fish per tank were sampled every 28 days, at time 9 (252 days), 10, (280 days), 11 (308 days), and 12 (336 days). Measurements and sample procedure were same as for the growth period of the experiment.

2.4 Chemical composition

Sub-samples of 10 g wet weight/relative tank weight were weighed from each fillet of the same tank, and then pooled together. Samples were taken from the middle of the upper part of the fillet. A pool of different feed sizes was collected for the analyses of the feeds. Analyses for dry matter, ash, crude protein, total lipid, gross energy and fatty acid profile were performed (Table 4). Fillet dry matter was obtained by first drying the pools in a lyophilizator seven days, then in a forced air oven at 105 °C overnight. Sample weight was recorded before and after drying, followed by cooling in a dessicator (AOAC, 1990). Feed dry matter was obtained by drying only in the forced air oven. Ash content was obtained by dry ashing in porcelain crucibles in a furnace at 500°C overnight and expressed as dry weight (AOAC, 1990). Gross energy was performed by bomb calorimetry (Parr Instrument Company Inc., Moline, IL) and calculated as percentage of dry matter. Crude protein was

evaluated using a LECO (model FP-2000; LECO Corporation, St-Joseph, MI), then a nitrogen (N) conversion factor of N x 6.25, expressed as dry weight.

Total lipid composition was performed with a Soxhlet HT-TECATOR[®] extractor (Soxtec System HT12, Foss Tecator AB; Hoganas, Sweden), the solvent being diethyl ether at 100 °C. Total lipids were expressed as dry weight. To determine the fatty acid composition of the diets and fillets, the AOAC FAME procedure (AOAC, 2000) was used. Samples were analysed at the *Centre de Recherche en Biotechnologies Marines*, Rimouski (QC) on a GC FID gas chromatograph from Hewlett-Packard model 5890 series II (Palo Alto, CA) equipped with a CP-Sil 88 capillary column (100 m x 0.25 mm). Oven temperature was held at 80 °C for 1 min before being raised to 215 °C (2 °C min⁻¹) for 30 min and maintained for 98 min. Injector temperature was 220 °C and detector temperature was 230 °C. Fatty acid peaks were identified, quantified and the gas chromatograph calibrated using pure methyl ester standards (Nu Chek Prep; Elysian, MN). Individual components were identified by comparing area under the curve with the ChemStation Rev: A 10.01 program (Agilent Technologies; Santa Clara, CA).

2.5 Digestibility measurements

To determine the digestibility of the experimental diets (Table 3), Sipernat 50TM (Jefo Nutrition Inc., Saint-Hyacinthe, QC) was included as an inert marker to determine apparent nutrient digestibility coefficients (ADC). The digestibility trial was performed with rainbow trout (222.6 ± 17.2 g) randomly allocated in 24 tanks (160 L) (n = 3) in a recirculating system at the *Laboratoire de Recherche en Sciences Aquatiques* of *Université Laval* (Quebec, QC). Tanks were filled with 20 fish, reaching approximately 28 kg/m³ biomass per tank. Water temperature was maintained at 12.6 ± 0.4 °C and other environmental parameters remained within limits recommended for salmonids (NRC, 1993).

Fish were acclimated three days to the feed and temperature before beginning of digestibility trial. Fish were hand-fed until apparent satiation twice daily (9:00 and 16:00). Feces were collected once a day for nine days via a modified Guelph system based on Cho et al. (1982), before the morning meal. They were stored at -20 °C until the end of the digestibility trial, and then thawed in a refrigerator at 4 °C. Feces were centrifuged to remove excess water and freeze dried for seven days prior to analysis to determine ADC for the nutrients and energy of test and reference diets (Cho et al.,1982):

$$\text{ADC} = 1 - (F / D \times D_i / F_i)$$

Where: D = % nutrient (or kJ/g gross energy) of diet; F = % nutrient (or kJ/g gross energy) of feces; D_i = % digestion indicator (AIA) of diet; F_i = % digestion indicator (AIA) of feces.

2.6 Contaminant exposure

Levels of POPs and mercury were evaluated at times 0, 9 (252 days), and 12 (336 days). Each fillet from the same tank was pooled by taking a sub-sample of 2g wet weight/relative tank weight from the middle of the upper part of the fillet, then homogenizing the pool. Experimental diets were also analysed for contaminant loadings. PBCs, organochlorine pesticides, toxaphenes, flame retardants and mercury concentrations were evaluated by the *Institut National de Santé Publique du Québec* (INSPQ) in Quebec City (QC). Tissue samples were enriched with internal standards, mixed with dichloromethane and chemically dried with sodium sulfate. Organohalogenated compounds were then extracted from the matrix by ultrasound sonification. Part of the organic solvent was used to determine the lipid weight in the sample. The residual fraction was concentrated, purified by gel permeation chromatography and florisil treatment. Extracts were analysed by gas chromatography mass spectrometry (gas chromatograph: Agilent, #6890; mass detector: Agilent, #5973; network and automatic sampler with automatic injector: Agilent, # 7683;

Agilent Technologies, Mississauga, ON). Ions generated were measured after negative chemical ionization. Analyte concentrations were evaluated by considering the % recovery of labelled internal standards (Agilent MSD CHEM # G1701CA; Agilent Technologies, Mississauga, ON). Mercury was analysed by cold vapour atomic absorption spectrometry (Mercury Monitor Model 100, Pharmacia; Piscataway, NJ) with an Application range from 0.05 µg/g (DL) to 10 µg/g for a sample weight of 0.5 g of wet tissue. Tissues were digested using concentrated nitric acid in pressurized teflon vessels. An aliquot of the digest was then introduced into the system's reaction chamber (containing a reducing solution of cadmium chloride and stannous chloride). The mercury vapour was generated and detected. Then, aqueous calibration was performed.

For PCBs, 15 congeners were analysed: Aroclor 1260, 28, 52, 99, 101, 105, 118, 128, 138, 153, 156, 170, 180, 183 and 187. The following organochloride pesticides were analysed: β-HCH, α-chlordane, γ-chlordane, cis-nonachlor, *pp'*-DDE, *pp'*-DDT, hexa-chlorobenzen, mirex, oxy-chlordane and trans-nonachlor. Five toxaphene congeners were analysed: parlar no. 26 (T2), parlar no. 32, parlar no. 50 (T12), parlar no. 62 (T20) and parlar no. 69. PBDE 47, PBDE 99, PBDE 100, PBDE 153 and PBB 153 were the flame retardants analysed.

2.7 Organoleptic properties

At the end of the growth period, five fish per tank were killed by cranial concussion. Fillets were kept skinless at -20 °C until needed. Testing of organoleptic properties was performed at the *Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments* (CRDA), Saint-Hyacinthe (QC). Prior to the preparation, fillets were placed at 4 °C overnight to thaw slowly. Fillets from the same tank were cut in small cubes (approx. 5 cm³), pooled together and well mixed. The extremities of the fillets and bones were discarded. Amber glass jars of 100 ml were filled with the cubes and sealed with a plastic cover. Each diet was identified by a three-number code to ensure blind testing. Jars were placed in a smokehouse at 72 °C, until the fish reached 70 °C in the middle. Jars were kept at 60 °C until judges were ready. Two

organoleptic trials were performed with four diets at the time, separating the diets according to the DP/DE ratio. For each trial, 19 judges tasted the fish and classified the jars from 1 (least intense flavour) to 4 (most intense flavour), using the following categories: fish flavour, off-flavour, firmness. Additional comments could also be added, i.e. greasy/oily texture/flavour, cereal flavour, rancid flavour and/or unknown flavour; personal comments could also be identified for each jar.

2.8 Economic estimates

The cost for one kilogram of each diet was estimated based on 2007 prices of raw ingredients (Table 11) and the amounts that were required to make the different diets. Therefore, calculated costs represent ingredients costs, not production nor selling costs. The economic conversion ratio (ECR) was determined using the following equation (Piedecausa, 2006):

$$\text{ECR} = \text{Cost of diet} \times \text{Feed conversion ratio (FCR)}$$

2.9 Statistical analyses

Experimental values for growth performance, chemical composition and fatty acid profile for the growth and wash-out periods were compared, as well as contaminant exposure and digestibility, using a two-way analysis of variance (ANOVA) in a complete randomized design. Treatment factors were the DP/DE ratio (2) and source of lipid (4) and each tank was the experimental unit (3 replicates per treatment combinations of DP/DE ratio and source of lipid). Values expressed in percentage were transformed with arcsin prior to the analysis. Normality was evaluated with Kolmogorov-Smirnov test. Differences between means were evaluated for significant differences with Tukey's multiple range test. Organoleptic properties were evaluated for statistical differences using a one-way ANOVA,

the factorial parameter being the source of lipid (4) and the experimental unit, the judge (19 replicates). The DP/DE ratios were not compared for the organoleptic trial. Differences between ranks of appreciation were compared with a Friedman test. The significance level was set at $p < 0.05$. Statistical analyses were performed using SAS 8.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC).

3. Results

3.1 Growth period

Fish survival was not influenced by the experimental diets and was over 97 % (Table 5). Average fish mass increased continuously through the experiment and no difference in weight gain was observed. The mean TGC was of 0.22 for the growth period and was not influenced by DP/DE ratio or the dietary lipid source. Values for FCR were influenced by DP/DE ratio and by the oil source (Table 5). Diet 18 FO had a significantly higher FCR (1.19), while 25 COS was lower than other experimental diets (0.98). Condition factor and hepatosomatic index were not influenced by the diet (Table 5). Average CF and HIS were respectively of 1.58 and 1.20.

With regards to fillet composition, no significant differences were observed for dry matter and ash content among the dietary groups tested. However, crude protein, total lipid and gross energy were significantly different between DP/DE ratios and dietary lipid sources (Table 6). Crude protein was the lowest for 18 FO and the highest for 25 SO and 25 CO. Total lipid and gross energy were higher for 18 FO and lower for 25 SO diet than other dietary groups (Table 6).

Muscle fatty acid composition was influenced by the diet. Differences between FO and vegetable diets seemed more important in the 18 DP/DE groups than in the 25 DP/DE groups for some fatty acids. For example, significant differences were observed between treatments in the 18 DP/DE group, but not in the 25 DP/DE group for 20:5 n -3 and 22:6 n -3

(Table 6). With respect to the DP/DE group, total SFA and MUFA muscle fatty acids were reduced by the inclusion of vegetable oils in the feed, particularly for total MUFA in soybean oil diets. However, SFA in 25 SO and 25 COS were not different when compared to 25 FO diet. SFA levels ranged from 16.8 % for the 18 CO group to 25.7 % for the 25 FO group. Total MUFA were the highest for the 18 FO group (54.1 %) and the lowest for the groups 25 SO (23.7 %) and 18 SO (23.5 %). Total $n-6$ (mainly 18:2 $n-6$) muscle fatty acids were significantly increased by the replacement of fish oil by vegetable oils in the diets. This statement is particularly significant for soybean oil-fed fish with 37.5 % total $n-6$ for the 18 SO group and 32.4 % for the 25 SO group. Although 18:3 $n-3$ was higher in fish fed vegetable oil feeds than fish oils, total $n-3$ muscle fatty acids did not follow precisely this path. In fact, total $n-3$ was the highest for 18 COS-fed fish (23.3 %), because of its high ADH content (19.1 %), mainly from the feed (11.3 %, Table 4). The lowest percentages were found in fish fed 18 FO diet (16.7 %) who had no accumulation of 18:3 $n-3$ and low ADH (14.2 %). Total polyunsaturated fatty acids (PUFA) were higher in muscle fatty acids of fish fed vegetable diets, especially for the SO groups fed high percentage of 18:2 $n-6$ (Table 4). However, $n-3/n-6$ ratios were lower in vegetable oil-fed fish than for fish fed FO diets, due to the high percentage of $n-6$ in the flesh. Again, fish fed SO diets had the highest PUFA levels and the lowest $n-3/n-6$ ratios due to their high percentage of 18:2 $n-6$ muscle fatty acids. No significant differences were observed for muscle fatty acids between respective DP/DE groups.

3.2 Wash-out period

An air-lock in the water distribution system killed fish from six tanks during the wash-out period, 36 days before the end of the experiment. As a result, six out of eight diets have results for duplicate tanks. Diets 25 CO and 18 CO were not affected by the mortalities. As these mortalities are not related to the dietary treatments, calculations of the percentage of survival do not consider this incident. Subsequently, survival is 100 % for all groups in the wash-out period (Table 7). Although no significant difference was seen in the weight gain, a clear tendency is shown between DP/DE ratios for the wash-out period. 25 DP/DE groups

improved their growth rate, while it remained relatively constant and high for the 18 DP/DE groups. Growth and nutrient utilization indices were not influenced by the treatment. TGC values were lower than in the growth trial (mean 0.16), while FCR values (1.23) were somewhat higher (Table 7). Moreover, HIS (1.18) did not vary between the trials, with the DP/DE ratio or with the lipid source. However, the CF index was influenced by the treatment. The 18 CO group had the highest CF value (1.65) and the 25 SO group, the lowest (1.47).

Following the wash-out period, no significant differences in dry matter, crude protein, total lipid, ash content or gross energy was found among groups.

The return to a feed with 100 % fish oil affected the composition of muscle fatty acids (Table 8). Total SFA were not different among feeding groups and were relatively high compared to the growth trial. Class 18:1 fatty acids were lower in all CO and COS groups, but overall total MUFA were higher in vegetable oil-fed fish because of the increase of 16:1, 20:1 and 22:1 fatty acids. This observation is particularly apparent for the soybean oil, as the 18 SO group increased its total MUFA content by 40.8 % and the 25 SO group, by 35.4 % (Table 8). Moreover, total *n*-6 decreased (mainly 18:2*n*-6), especially in the SO groups, resulting in a decline of total PUFA levels. However, following the wash-out period, fish fed with soybean oil still had total *n*-6 above all groups, with the highest percentage for the 18 SO group (18.2 %), followed by the 25 group (17.2 %). Total *n*-3 were not significantly different between groups and remained constant (Table 8). With the decline in total *n*-6 percentages, overall total PUFA also decreased. With respect to the DP/DE category, muscle fatty acid percentages of vegetable oil-fed fish resemble fish oil-fed groups, except for fish fed SO. Additionally, *n*-3/*n*-6 ratios were not significantly different for the CO and COS groups than FO-fed groups, but the SO groups still had a low *n*-3/*n*-6 ratio (Table 8). With a wash-out period of 84 days, muscle fatty acids of fish fed primarily with vegetable oils restored their beneficial fatty acid levels, excluding the soybean oil groups that would have needed more time to wash out the high *n*-6 fatty acids. No significant differences were observed for muscle fatty acids among respective DP/DE

groups, indicating that both ratios are suitable for the production of a good quality fish, after a short wash-out period.

3.3 Digestibility of experimental diets

The apparent digestibility coefficients of crude protein were not influenced by the DP/DE ratios or by the dietary lipid source (Table 9). However, ADC of dry matter, total lipid and gross energy varied within the experimental feeds. The 18 FO diet had a significantly lower ADC for dry matter, total lipid and gross energy. The diets with the 25 DP/DE ratio had the highest ADC for dry matter, followed by the 18 COS, CO and SO diets. Lipid ADC was the highest for the 25 SO diet, followed by 25 CO, 25 COS, 18 SO and 18 COS diets. ADC of gross energy was the highest for the 25 CO diet, followed by 25 COS, FO and SO diets (Table 9).

3.4 Contaminant loading

No mercury was found in experimental diets and in any of the sampled fillets. PCBs, organochlorine pesticides, toxaphenes and flame retardants results for experimental diets are presented in Figure 3. Diets with fish oil have the highest content of PCBs, organochlorine pesticides and toxaphenes.

POPs levels for initial fillets, growth and wash-out phase fillets are shown in Figure 4. In growth trial fillets, PCBs were significantly higher for 18 FO than other groups and were the lowest for the 25 SO, CO, COS groups (Figure 4A). Organochlorine pesticides were highest in the 18 FO group and the lowest in the 25 SO and CO groups (Figure 4B). For the toxaphenes levels, the highest levels were found in the 18 FO and 25 FO groups and were lower in all other experimental diets (Figure 4C). Flame retardants were not significantly different for the growth trial (Figure 4D).

In wash-out trial fillets, no significant differences were observed for PCBs, organochlorine pesticides, toxaphenes and flame retardants (Figure 4). However, PCBs, organochlorine pesticides and toxaphenes were greater in the wash-out trial than the growth trial. Flame retardants showed a different pattern in which some diets had a tendency of lower concentrations in the wash-out fillets than in the growth fillets (Figure 4D).

3.5 Organoleptic properties

No statistical differences were apparent among fish fed different dietary lipids in each DP/DE group (Table 10). Overall, judges detected no difference in the taste, appetite and the aspect of vegetable oil-fed fish compared to fish oil-fed fish, with each DP/DE group.

3.6 Economic estimates

Regarding economic estimates (Table 12), 18 DP/DE diets were least expensive and had the best economic conversion ratio (ECR). With respect to the DP/DE ratio, when comparing ECR values, SO and CO diets were less expensive than the respective fish oil diet. Diets consisting of a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. (COS) were the most expensive.

4. Discussion

For the growth period, we predicted that survival, weight gain, TGC, FCR, CF, HIS, fillets composition (dry matter, ash, crude protein, total lipid, gross energy) and fatty acid profiles would not vary with regards of the oil source and the DP/DE ratio in the feed. This hypothesis was verified for survival, weight gain, TGC, CF and HIS, but not for FCR that was influenced by DP/DE ratio. Our hypothesis was also confirmed in fillets for dry matter and ash content, but not for crude protein, total lipid, gross energy and muscle fatty acids that varied according to DP/DE ratio and dietary lipid sources. The initial hypothesis for the

wash-out period was that no significant difference would be seen between dietary groups for survival, weight gain, TGC, FCR, CF, HIS, fillet composition (dry matter, ash, crude protein, total lipid, gross energy) and fatty acid profiles. Our hypothesis was verified for survival, weight gain, TGC, FCR and HIS, but not for CF that was influenced by dietary treatment. Our hypothesis was confirmed for fillet composition, but not for fatty acid profiles that varied with DP/DE ratio and dietary lipid sources. We predicted that digestibility of nutrients and gross energy would not vary between dietary treatments. This hypothesis was verified for ADC of crude proteins, but not for dry matter, total lipids and gross energy. With respect to the DP/DE ratio, contaminants loadings were predicted to be lower for the groups fed with vegetable oil-based feeds than FO-based feeds, in the growth period as well as in the wash-out period. Also, 25 DP/DE groups were expected to have lower contaminants loadings than 18 DP/DE groups because of their lower FO content. For the growth period, the hypotheses were confirmed for PCBs, organochlorine pesticides and toxaphenes, but flame retardants were not significantly different between DP/DE ratios nor between dietary lipid sources. As no significant difference was observed between dietary treatments in the wash-out period, the hypotheses were not confirmed for all POPs. Organoleptic properties were predicted not to vary between experimental feeds and this was confirmed. As for ECR values, it was expected that vegetable oil-based diets would be less expensive to produce than FO diets, with regards to the DP/DE treatment. Diets with SO and CO verified the hypothesis, but COS-based diets were more expensive than FO diets.

4.1 Growth trial

The 18 DP/DE ratio had a greater percentage in oil and contained less fish meal than the 25 DP/DE diets (Table 3). While the levels of fish meal was not altered in vegetable diets, total fish oil fall by 75 %, so the overall fish by-product content in vegetable diets is markedly reduced. For example, the 18 SO and 18 CO diets contained 40.6 % fish by-products (18.6 % fish oil and 22.0 % fish meal) and all 25 DP/DE diets had 32.5 % fish by-products (fish meal only). As the main contaminant exposure comes from fish oil, which is more than twice as more expensive than fish meal, 25 DP/DE vegetable diets could be the best dietary

approach to reduce POPs content. However, these diets must contribute in maintaining growth and somatic parameters, as well as the high quality of the flesh in terms of fatty acid content and organoleptic properties.

Growth performance and somatic parameters were similar among experimental fish, and no mortality was observed, indicating that soybean and canola oils (with or without the algal biomass) can replace 75 % of total fish oil in rainbow trout feed, without affecting health or growth.

As the composition of dietary fatty acids has an effect on the muscle fatty acids, the high accumulation of 18:2 n -6 in the flesh, especially the SO groups, could be due to the direct absorption of dietary fatty acids in the muscle (Henderson, 1996). Moreover, these percentages could be explained by the great affinity of 18:2 n -6 and the acyltransferases that synthesize phospholipids containing this fatty acid (Caballero et al., 2002). Also, the accumulation 20:3 n -6, the product of the Δ 6 desaturation and elongation of 18:2 n -6, reveals a high activity of these enzymes when fish are fed high percentages of soybean oil. With Atlantic salmon fed high levels of sunflower oil, Bell et al. (1996) observed similar comparisons in macrophage phospholipids. When comparing the 18:2 n -6 availability in the diets with the percentage in the fillets, an important decrease was observed. With the exception of the SO groups, no metabolic intermediates were found for the desaturation and elongation of 18:2 n -6 to 22:5 n -6 suggesting that 18:2 n -6 was necessary for other physiologic requirements, for example, catabolizing energy (Greene and Selivonchick, 1990). The 22:5 n -6 in the COS groups appears to come from the direct absorption of DPA from the algal biomass.

It seems no competition was present between 18:3 n -3 and 18:2 n -6 for the desaturation and elongation by the Δ 6 desaturases, even when dietary 18:2 n -6 levels were high (32.0% for 18 SO and 26.2% for 25 SO, Table 6). Similar results have been recorded for Atlantic salmon fed sunflower oil (Bell et al., 1996) and rainbow trout fed different vegetable oils (Caballero et al., 2002). Bell et al. (1996) noted, however, a competition between these

fatty acids when the diet was rich in 18:3 n -3 (31.4 %) from linseed oil, resulting in an inhibition of the bioconversion of 18:2 n -6 to 22:5 n -6.

Results of this study reveal that the composition of the flesh reflects a selective incorporation of essential fatty acids (EFA), especially for EPA and DHA. These EFA are probably adjusted to a narrowly-defined physiological level into triacylglycerols and phospholipids (Greene and Selivonchick, 1990; Sargent et al., 1999; Sargent et al., 2002). In this regard, the preferential retention of EFA seems to influence the fatty acid content of the muscle (Caballero et al., 2002). Therefore DHA, the major PUFA in phospholipids, is affected to a lesser extent by the DHA content in the diet. Similar observations have been reported for brown trout (*Salmo trutta* L.) fed canola oil, poultry fat, pork lard and oleine oil (Turchini et al., 2003). Elongation and desaturation of EFA was observed for all experimental groups, mainly for fish fed lower n -3 diets, and levels of n -3/ n -6 were higher in the muscle than in the diet. In comparison with results from Greene and Selivonchick (1990) where conversion of 18:3 n -3 in EPA and DHA reached its limit at 14 % of total muscle lipids, it seems that our experimental groups reached their limit at 20.3 % (18 COS and 25 COS), irrespective of the total dietary n -3 available. Regardless of the initial content of EPA in the diets, experimental groups were able to accumulate and produce equivalent percentages of EPA than in the FO diets. The 18 CO groups even had a higher content of EPA than its control FO group. DHA accumulation in the muscle also followed this trend, the overall muscle composition in DHA tended to be similar than for fish oil-fed trout. With this capacity of synthesizing DHA to maintain its concentration in the flesh, fish demonstrate the importance of this structural lipid for its own physiological requirements (Henderson, 1996; Sargent et al., 2002). In addition, fish feed with a blend of canola and algae had the greatest accumulation of DHA. When comparing CO and COS groups, it is clear that *Schizochytrium* sp. contributes to the overall DHA content in the muscles. As a result, total n -3 fatty acids were maintained or higher than for the control FO groups.

It is now well documented that, in terms of human health, it is essential to increase the daily consumption of n -3, mainly EPA and DHA, and to reduce n -6 daily intake, particularly

18:2 n -6 (Simopoulos, 1999). For the growth phase alone, however, n -3/ n -6 ratios were too low compared with the FO groups because of the high content of n -6 in the flesh. Thus, canola and the blend of canola and algae were good-quality candidates for 75 % fish oil replacement in rainbow trout feeds, irrespective of the DP/DE ratio used. However, a wash-out phase is required to balance beneficial n -3 levels in the final product.

4.2 Wash-out period

During the wash-out period, weight gain was not different among groups. With a switch to a diet with 100 % fish oil, TGC values (mean 0.16) dropped about 27 % between growth and wash-out trials. As fish grow, their potential for rapid growth diminishes, because nutrient utilisation is aimed for physiological changes that comes with maturity, for example reproduction and maintenance (Day and Taylor, 1997; Charnov et al., 2001; Dumas et al., 2007). This shift in nutrient partitioning could be responsible for the decrease of TGC values in the wash-out phase because individuals were larger than in the growth phase and some were already mature. FCR values (mean 1.23) were similar to 50 % (1.25) and 100 % (1.18) rapeseed oil feeds observed for Bell et al. (2005).

In this study, the wash-out period represented 33 % of the growth period, which is important when determining the time required to restore beneficial fatty acid levels in rainbow trout. The aim is to shorten the wash-out period to maintain low POPs levels and minimise costly fish by-product use in the whole production cycle, while allowing EFA restoration. The DP/DE ratios did not significantly influence the fatty acid accumulation in the flesh for the 25 DP/DE groups. In the 18 DP/DE groups, significant differences were observed between the FO and the SO groups. Even after a wash-out period, fish previously fed with soybean oil did not recover beneficial fatty acid levels, therefore this oil can not be sustainable for rainbow trout farming in the experimental conditions of this study.

In the growth phase, we have seen that trout fed soybean oil accumulated high levels of $n-6$ in the flesh, reducing the quality for human consumption. During the wash-out phase, fish previously fed with vegetable oils, particularly soybean oil, significantly reduced their 18:2 $n-6$ content, consequently total $n-6$ levels were lowered. For the SO groups, this reduction of $n-6$ concentration was around 50 %. For the other groups, the switch to lower $n-6$ fatty acids content was less apparent because of reduced $n-6$ accumulation during the growth phase than the SO groups. Irrespective of the DP/DE ratio, fish from the CO and COS groups restored $n-6$ levels, but the SO groups still had higher levels in the flesh. A longer wash-out period could have contributed in the total restoration of beneficial fatty acids for the SO groups, but it also could have raised the POP levels.

While $n-6$ levels were decreased in the wash-out period, $n-3$ levels remained as they were in the growth period. 18:3 $n-3$ levels were lowered for all vegetable oil-fed groups, but DHA levels were increased, balancing the total $n-3$ content. EPA percentages remained the same for overall diets. For the 18 CO group, however, EPA levels significantly fell to reach approximate final 18 FO levels. In summary, $n-3$ levels were restored in all experimental groups, although a tendency of higher accumulation of DHA in the COS groups can be distinguished. The wash-out trial significantly reduced PUFA levels by lowering total $n-6$ and had a direct effect to increase $n-3/n-6$ ratios. Trout from the CO and COS groups restored their fatty acid levels, but the SO groups accumulated a higher $n-6$ level. Further analysis would be needed to understand the restoration profile of fatty acids to determine the shortest wash-out period required to restore beneficial fatty acids levels.

We therefore conclude that the inclusion of 75 % soybean oil in rainbow trout feed is not a suitable alternative to fish oil replacement in the experimental conditions we tested. In addition, after a short wash-out period that contributes in restoring beneficial EFA levels, canola oil and the blend of canola oil plus *Schizochytrium* sp. are high-quality candidates for replacing 75 % of fish oil in rainbow trout diet, irrespective of the DP/DE ratio in the diets.

4.3 Contaminant loading

Levels of POPs in flesh were well under recommendations for mercury (1 ppm), PCBs (2.0 ppm), toxaphenes (1.0 ppm) and organochlorine pesticides (5.0 ppm) (Health Canada, 2007; U.S. Food and Drug Administration (FDA), 2007 and the European Committee, 2007). Currently, no recommendations are available for flame retardants.

The majority of contamination exposure comes from two ingredients in the feed: fish meal and to a larger extent, fish oil (results not shown). None of the vegetable oils contained POPs or mercury, nor did the algal biomass. Of all feeds, the 18 FO diet had the highest concentration of fish oil (Table 3) and displayed the highest levels of PCBs, organochlorine pesticides and toxaphenes. Bell et al. (2005) replaced 17 % and 35 % fish oil by a 1:1 combination of linseed and canola oil fed to Atlantic salmon. The growth period was of 115 weeks; afterwards a wash-out feed of 35 % fish oil was given for 24 weeks. The dioxin and dioxin-like concentrations in the flesh followed the pattern of the present study, such that the bioaccumulation being greater in fish feed high percentages of fish oil. Berntssen et al. (2005) fed Atlantic salmon with 100 % vegetable oil blend (55 % rapeseed oil, 30 % palm oil and 15 % linseed oil) for 22 months and observed reduced dibenzo-*p*-dioxins, dibenzofurans (PCDD/F), and dioxin-like PCBs (DLPCB), although, *n*-3/*n*-6 ratio fatty acid ratio was negatively affected. In this respect, the replacement of fish oil by vegetable oils is an excellent alternative for reducing contaminant exposure for rainbow trout. Since these oils alter the quality of the flesh by increasing *n*-6 and *n*-9 levels while diminishing *n*-3 levels, a wash-out feed must be included to restore beneficial LC-PUFA levels in the flesh.

Results from the growth trial in Figure 4 outline the greater accumulation of POPs in the FO groups, particularly for the 18 FO-fed fish. Vegetable oil sources contributed in reducing the POPs levels, irrespective of the DP/DE ratios. The 18 DP/DE groups had a tendency for a greater percentage of flame retardants than the 25 DP/DE groups, however, levels were very low, less than 1.5 ppb. We can therefore conclude that vegetable oils

reduce the exposure to POPs, no matter the DP/DE ratio, in the experimental conditions of this study.

When comparing experimental results for the wash-out phase, a switch to a 100 % fish oil feed increased the accumulation of PCBs, organochlorine pesticides and toxaphenes in the flesh. This statement is more obvious with the vegetable oil-feed groups, where POPs were rapidly accumulated, but still lower than in the fish oil-feed groups. Once again, a tendency of lower POPs concentration is noticeable for the 25 DP/DE group, but is not significant. Very little information is available on the accumulation of POPs in the flesh during a wash-out period. Bell et al. (2005) obtained similar results. Vegetable oil-fed fish quickly accumulated contaminants during the 24-week wash-out trial, but concentrations remained lower than for the comparative group fed with fish oil. Flame retardant accumulation in the flesh does not follow the path of BCPs, toxaphenes and organochlorine pesticides. In fact, concentrations decreased during the wash-out period for all experimental groups but 25 SO. As fish oil has a greater percentage in flame retardant levels than other vegetable oils, and fish were fed 100 % FO diets, these data are in opposition with expected results. However, contaminant data from the wash-out trial are only duplicates, so further analysis would be needed, but overall levels are again very low (less than 1.5 ppb) and could be considered as insignificant.

In terms on POPs exposure, all vegetable feeds have ability to reduce the accumulation in the flesh, in the growth phase, as well as in the wash-out period. Even if levels were increased for PBCs, toxaphenes and organochlorine pesticides in the wash-out period of this study, final concentrations were still well below than recommended levels from Health Canada, the FDA and the European Committee (Environnement Canada, 2005; FAIR Agriculture and Fisheries, 2007; FDA, 2007).

4.4 Suitability of experimental diets for the industry

4.4.1 Sensory parameters

Results from the sensory trial clearly demonstrate that feeding rainbow trout with 75 % soybean oil, canola oil or a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. does not change sensory parameters of the fish after 252 days of feeding with these experimental diets, regardless of the DP/DE ratio. Very little information is available on sensory parameters for salmonids. Boggio et al. (1985) found similar results for rainbow trout fed with swine fat supplemented with alpha-tocopheryl acetate during four months. Also, no significant differences were detected for Atlantic salmon fed soybean oil or tallow for 23 weeks (Hardy et al., 1987) and fed partially oxidised oils for 52 days (Koshio et al., 1994). However, Thomassen and Røsjø (1989) reported that the colour, taste and smell of Atlantic salmon were altered when fed diets with soybean and rapeseed oils 18 weeks, while Arzel et al. (1994) found a difference in texture and taste of the flesh of brown trout fed high levels of corn oil for 110 days. Still, the difference between canola and soybean oils for Guillou et al. (1995) was small, and no difference for texture was observed for Brook charr in a nine week experiment.

4.4.2 Digestibility of experimental diets

Results show that the reduction of FO content in the feed (18 FO vs 25 FO) improves ADC of dry matter and lipids (Table 9). Apparent digestibility of dry matter is in accordance with results from Windell et al. (1978) for medium (ADC of 72 %) and large (74 %) rainbow trout fed fish meal at three different temperatures (7, 11 and 15 °C). Cho et al. (1974) had an ADC in a range of 70 to 77 % with rainbow trout fed marine oils and different protein sources. However, Olsen et al. (2004) fed 500 g Atlantic salmon with *Calanus finmarchicus* at 10 °C seawater and obtained an ADC of 95 % while our results range between 73 and 82 %. Apparent digestibility was the highest for 25 CO and the lowest for 18 FO diet. Digestibility of crude protein was between 88 and 95 % (Cho, 1974; Windell, 1978; Cho

and Kaushik, 1990). Our results are not significantly different and are in accordance with these authors. Results stand fall the range described by the NRC (1993) where digestibility for fish usually varies in a range of 75 to 95 %. In multiple digestibility trials with rainbow trout using feather meal, meat and bone meal, poultry by-product meal, and blood meal, Bureau et al. (1999) observed digestibilities between 68 and 99 % for gross energy. Cho and Kaushik (1990) had an average of 76 % and Cho et al. (1974), 79 %. Our digestibilities of gross energy for experimental diets were therefore similar as these studies, ranging between 81 % and 90 %. The diet with the highest digestibility was 25 CO while the diet with the lowest digestibility was 18 FO.

According to Caballero et al., (2002) high lipid ADC for the vegetable oil-based diets is related to their high PUFA content, consequently, their low melting point. Results from Cho and Kaushik (1990) support this observation with apparent digestibility of rainbow trout reared in temperatures varying from 5 to 15 °C. When fed rapeseed, soybean, linseed or fish oils, ADC was high (between 80 and 95 %). Conversely, when trout were fed lard and tallow, which have high melting points because of high SFA concentrations, ADC decreased compared to other lipids sources. Therefore, the melting point of lipids influences their digestibility for rainbow trout. However, this theory can not explain the variations in digestibility obtained in this study, as fish oil and vegetable oils have a similar melting point. Bureau et al. (2007), that had a high ADC for tallow fed to rainbow trout, suggest ADC is not only a matter of lipid's melting point but also of the "synergistic effect" of PUFA on the digestibility of SFA. Differences in results may be due to the methodology used by Cho and Kaushik (1990) where experimental diets were formulated with a reference diet that was poor in lipids (< 5 %). The addition of oils rich in PUFA would have increased the ADC of SFA, and thereby the ADC of total lipids. Overall, the balance between PUFA and SFA in the diet is crucial to obtain a high ADC. The 18 FO diet, witch has the highest percentage in fish oil and total fish by-products, has the lowest digestibility. This diet also has a high SFA/PUFA ratio (1.07) compared to vegetable oil diets (mean 0.38), confirming previous suggestions on lipid digestibility, where the SFA/PUFA ratio of the diet is crucial in the digestibility of a diet. Therefore, our results are in accordance with previous studies and Caballero et al. (2002) with rainbow trout reared at 12 °C (ADC =

79.2 to 92.5 %). In conclusion, apparent digestibility of nutrient and gross energy of the eight experimental diets, irrespective of the DP/DE ratio and the lipid source, is highly suitable for the industry and these diets are appropriate for rainbow trout.

4.4.3 Economic parameters

Experimental diets had an average FCR ratio of 1.1 (Table 12). Therefore, values stand in the range of average commercial diets, between 0.8 and 1.5. With an assumption of a farm producing 300 tonnes of trout per year, feeds costs were evaluated (Table 12). When prices are compared to respective FO diets, using vegetable oils in feeds reduces feeds costs by 31.1 % for 18 SO, 31.2 % for 18 CO, 14.4 % for 25 SO and 15.0 % for 25 CO. Diets with a blend of canola oil and algae were the more expensive by 83.7 % for 18 COS and 68.5 % for 25 COS than respective FO diets. Our prices are based on individual ingredient prices, so the industrial cost for production and marketing is not considered. As a result, 18 DP/DE SO and CO diets would be the most effective diets for reducing feeding costs, irrespective of the alternative source of oil in the feed.

In sum, experimental diets are well formulated to suit the industry. The apparent digestibility of vegetable oil-based diets is high and similar to the FO diets, irrespective of the DP/DE ratio. Also, the fact that no significant difference was detected in sensory parameters of experimental groups suggests the appetite of rainbow trout vegetable diets would be as high as any regular rainbow trout farmed with only a fish oil-based diet. In addition, the economic evaluation established that feeding soybean or canola-based diets would lower feeding expenses by more than 26 % in the case of the 18 DP/DE vegetable diets and by more than 12 % for the 25 DP/DE diets.

5. Conclusions

The aim of this study was to reduce the utilisation of fish oil and fish meal in rainbow trout feeds in order to minimise POPs exposure and feed costs. The replacement of 75 % total fish oil by vegetable oils and the alteration of DP/DE ratios confirmed previous studies where apparent digestibility, growth, somatic and sensory parameters were not influenced by the feed, muscle fatty acids, contaminant loadings, apparent digestibility and costs of these experimental diets. The source of alternative lipids and DP/DE ratios did not affect apparent digestibility, growth, somatic and sensory parameters for trout. However, muscle fatty acids, mainly *n*-6, were affected by vegetable oils, particularly SO. During the growth trial, *n*-6 levels increased and *n*-3 percentages increased less dramatically. As a result, *n*-3/*n*-6 levels were negatively affected, especially for the SO groups. During the wash-out trial, muscle fatty acids were restored for the two CO and COS groups, but the SO groups still had high *n*-6 content. Further analysis is needed to assess the restoration profile of fatty acids during the 3 months wash-out trial. In the growth trial, POPs were lower in vegetable oil-fed trout of the 18 and 25 DP/DE groups. The wash-out trial increased POPs percentages, but levels are under Health Canada, FDA and the European Committee's recommendations. As for the economic estimates, 18 DP/DE feeds reduced feeding costs by more than 26 % and more than 12 % for the 25 DP/DE feeds. Because 25 DP/DE vegetable feeds contain less fish oil than 18 DP/DE diets and because no significant difference was observed in the performance between the two ratios, we suggest that 25 DP/DE feeds must be seriously considered for industrial farming. In conclusion, replacing 75 % of total fish oil in rainbow trout feed by CO and COS, combined with a 25 DP/DE ratio, seems to be the most efficient in terms of maximizing the total fish by-product replacement, while reducing POPs exposure. However, the addition of *Schizochytrium* sp. is actually not sustainable for the industry because of its high cost.

Acknowledgments

We thank AquaNet, EWOS inc. (Surrey, BC), *La Société de Recherche et de Développement en Aquaculture Continentale* inc. (SORDAC) (Quebec, QC), *La Société de Développement de l'Industrie Maricole* inc. (SODIM) (Gaspé, QC), *Le Réseau Aquaculture Québec* (RAQ) (Rimouski, QC), Bi-Pro Marketing Ltd. (Guelph, ON) and the Canola Council of Canada (Winnipeg, MB) for financial support. Advanced BioNutrition (Columbia, MD) kindly provided the algal biomass (S-Type Gold Fat), Soya Excel (Beloil, QC) the soybean oil, and Bunge (Montreal, QC) the canola oil. A special thanks to N. Durand and J. Fortin of the *Centre de Recherche et de Développement sur les Aliments* (CRDA) (Saint-Hyacinthe, QC) for their time and help during the organoleptic trial. The technical assistance of the Alma Aquaculture Research Station staff (AARS, Elora, ON), B. Bullis, B. Chabot, A. Desmeules, G. Dagenais, A. Dubé, O. Fecteau, F. Giguère, S. Houle, N. Gruyer, R. Gervais, É. Laurin, S. Lefebvre, R. Moccia, R. Prince, É. Proulx, S.-M. Scantland-Marchand, and J.-C. Therrien is acknowledged.

Tables

Table 3
Feed components and chemical composition of experimental diets (g/kg dry matter).

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS
Ingredient composition								
Fish oil, herring	21.3	2.7	2.7	2.8	13.5	0.0	0.0	0.0
Soybean oil	0.0	18.6	0.0	0.0	0.0	13.5	0.0	0.0
Canola oil	0.0	0.0	18.6	15.0	0.0	0.0	13.5	10.5
<i>Schizochytrium</i> sp.	0.0	0.0	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	6.5
Herring meal	22.0	22.0	22.0	22.0	32.5	32.5	32.5	32.5
Blood cell meal	7.0	7.0	7.0	7.0	10.0	10.0	10.0	10.0
AP301								
Corn gluten meal	21.0	21.0	21.0	20.0	34.0	34.0	34.0	33.0
Wheat middlings	13.0	13.0	13.0	10.5	4.0	4.0	4.0	2.3
Whey	11.4	11.4	11.4	9.5	2.8	2.8	2.8	2.0
Sipernat™	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
CaHPO ₄	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Lysine	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Vitamin/mineral premix ¹	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Carophyll pink premix	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Chemical composition								
Dry matter (g/kg)	92.0	92.0	91.2	92.8	92.5	93.1	92.6	92.0
Crude protein	45.2	44.6	45.4	46.4	61.6	61.7	62.1	61.7
Total lipid	21.6	21.4	21.2	22.5	15.3	15.4	15.9	16.2
Ash	7.5	7.5	7.7	8.1	8.5	8.4	8.4	8.9
Gross energy (MJ/kg DM)	24.4	24.3	24.4	24.5	24.1	23.9	24.1	24.0
Calculated P/E ratio (g DM/MJ) ²	18.5	18.3	18.6	18.9	25.5	25.8	25.8	25.7

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids).

¹ Salmonid vitamin/trace mineral premix from Corey (Fredericton, NB).

² P/E ratio = protein/energy ratio; calculation based on crude protein and gross energy values determined for the experimental diets.

Table 4
Fatty acid profile of experimental diets (% of total fatty acids).

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS
Fatty acid								
14:0	3.4	0.0	0.0	3.2	5.3	0.0	0.0	5.3
16:0	14.7	13.1	8.4	12.6	13.2	14.4	9.5	12.0
18:0	2.6	3.7	2.6	2.2	2.1	4.1	2.9	1.7
Total SFA ¹	20.7	16.8	11.0	17.9	20.6	18.5	12.4	20.6
16:1	0.0	0.0	0.0	1.6	6.2	0.0	1.8	6.3
18:1	36.3	18.3	51.4	37.8	12.0	19.0	49.7	11.2
20:1	0.0	2.7	3.3	2.8	12.9	0.0	1.8	15.3
22:1	0.0	4.4	4.3	3.3	25.0	0.0	0.0	29.3
24:1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	1.9
Total MUFA	36.3	25.4	58.9	45.5	58.1	19.0	53.3	64.0
18:2 <i>n</i> -6	16.7	47.0	20.0	14.8	8.9	47.5	21.0	7.4
20:2 <i>n</i> -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20:3 <i>n</i> -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20:4 <i>n</i> -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22:5 <i>n</i> -6	4.2	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total <i>n</i> -6 ²	20.9	47.0	20.0	18.7	8.9	47.5	21.0	7.4
18:3 <i>n</i> -3	4.2	7.2	6.1	4.5	0.0	7.0	5.8	0.0
20:5 <i>n</i> -3	5.0	1.8	1.9	2.0	4.2	4.7	4.4	3.1
22:6 <i>n</i> -3	13.0	1.8	2.1	11.3	6.2	3.3	3.1	5.0
Total <i>n</i> -3	22.1	10.9	10.1	17.8	10.4	15.1	13.3	8.1
Total PUFA	43.0	57.8	30.1	36.5	19.3	62.5	34.3	15.5
<i>n</i> -3/ <i>n</i> -6	1.1	0.2	0.5	1.0	1.2	0.3	0.6	1.1

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids); TFA, total fatty acid; TL, Total lipid; SFA, saturated fatty acid; MUFA, monounsaturated acid; PUFA, polyunsaturated fatty acid.

¹ Includes 15:0, 17:0, 20:0 and 22:0.

² Includes 18:3 *n*-6.

Table 5

Effect of fish oil replacement with soybean oil, canola oil and a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. biomass on rainbow trout growth, nutritive utilization and somatic parameters after growth trial.

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS	Pooled SEM
Initial weight (g)	43.6	44.1	44.0	43.2	44.0	43.3	43.2	43.7	0.2
Final weight (g)	611.7	591.7	570.2	583.0	591.0	572.3	535.7	574.1	6.5
Weight gain (g)	568.1	547.6	526.2	539.7	547.0	529.1	492.5	530.4	6.4
TGC	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	0.22	0.21	0.22	0.00
FCR	1.19 ^a	1.06 ^{b,c,d}	1.14 ^{a,b}	1.09 ^{b,c}	1.07 ^{b,c,d}	1.02 ^{c,d}	1.05 ^{b,c,d}	0.98 ^d	0.01
CF	1.61	1.61	1.59	1.62	1.49	1.47	1.58	1.51	0.02
HIS	1.28	1.12	1.15	1.12	1.18	1.24	1.28	1.21	0.02
Survival %	97.8	100.0	100.0	99.3	100.0	98.5	99.3	98.5	0.1

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids); TGC, Thermal growth coefficient; FCR, Feed conversion ratio; CF, Condition factor; HIS, Hepato-somatic index. Data represent the mean ± standard error means of three replicates, except for survival data presented as mean ± standard deviation of three replicates. Within the same line, different superscripts indicate significant differences due to the diet ($p < 0.05$).

Table 6

Effects of fish oil replacement with soybean oil, canola oil, and a blend of canola and *Schizochytrium* sp. biomass on fillet composition (g/kg DM) and fatty acid profile (% of total fatty acids) after growth period.

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS	Pooled SEM
Fatty acid									
14:0	4.2 ^a	0.0 ^c	0.0 ^c	2.2 ^{a,b}	3.7 ^a	0.5 ^{b,c}	0.5 ^{b,c}	2.2 ^{a,b}	0.3
16:0	16.5 ^{b,c,d}	16.3 ^{c,d}	13.0 ^e	14.9 ^d	18.3 ^{a,b}	19.0 ^a	16.6 ^{b,c}	17.2 ^{a,b,c}	0.4
18:0	3.0 ^f	4.7 ^b	3.9 ^{c,d}	3.4 ^{e,f}	3.7 ^{d,e}	5.5 ^a	4.6 ^b	4.3 ^{b,c}	0.2
Total SFA ¹	23.8 ^a	21.0 ^b	16.8 ^c	20.5 ^b	25.7 ^a	25.0 ^a	21.8 ^b	23.8 ^a	0.6
16:1	6.7 ^a	1.2 ^{c,d}	1.7 ^{b,c}	0.6 ^d	6.6 ^a	2.6 ^b	3.0 ^b	2.6 ^b	0.5
18:1	17.4 ^c	18.2 ^c	43.5 ^a	34.8 ^b	20.8 ^c	20.7 ^c	40.5 ^a	34.6 ^b	2.1
20:1	12.2 ^a	2.4 ^b	3.8 ^b	3.2 ^b	9.3 ^a	0.4 ^c	2.5 ^b	2.3 ^b	0.8
22:1	15.9 ^a	1.7 ^c	0.0 ^d	2.6 ^c	11.2 ^b	0.0 ^d	0.0 ^d	0.0 ^d	1.1
24:1	2.0 ^a	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^c	1.8 ^b	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^c	0.2
Total MUFA	54.1 ^a	23.5 ^e	49.0 ^{a,b}	41.1 ^{c,d}	49.6 ^{a,b}	23.7 ^e	46.0 ^{b,c}	39.5 ^d	2.3
18:2 <i>n</i> -6	5.5 ^e	32.0 ^a	13.6 ^c	11.3 ^d	6.0 ^e	26.2 ^b	12.3 ^{c,d}	11.0 ^d	1.9
20:2 <i>n</i> -6	0.0 ^b	2.0 ^a	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	2.0 ^a	0.0 ^b	0.0 ^b	0.2
20:3 <i>n</i> -6	0.0 ^b	2.3 ^a	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	2.3 ^a	0.5 ^b	0.0 ^b	0.2
20:4 <i>n</i> -6	0.0 ^b	1.3 ^a	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	2.0 ^a	0.0 ^b	0.0 ^b	0.2
22:5 <i>n</i> -6	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^c	3.7 ^a	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^c	3.1 ^b	0.3
Total <i>n</i> -6 ²	5.5 ^e	37.5 ^a	13.6 ^{c,d}	15.0 ^c	6.0 ^e	32.4 ^b	12.9 ^d	14.1 ^{c,d}	2.3
18:3 <i>n</i> -3	0.0 ^d	3.8 ^a	3.5 ^a	3.1 ^b	0.0 ^d	2.9 ^b	2.6 ^c	2.4 ^c	0.3
20:5 <i>n</i> -3	2.5 ^{a,b,c}	2.1 ^{b,c}	4.2 ^a	1.2 ^c	2.7 ^{a,b}	2.5 ^{a,b}	2.7 ^{a,b}	2.7 ^{a,b}	0.2
22:6 <i>n</i> -3	14.2 ^{b,c}	12.1 ^c	12.8 ^c	19.1 ^a	16.0 ^{a,b,c}	13.4 ^{b,c}	14.1 ^{b,c}	17.6 ^{a,b}	0.6
Total <i>n</i> -3	16.7 ^c	17.9 ^{b,c}	20.5 ^{a,b,c}	23.3 ^a	18.7 ^{a,b,c}	18.8 ^{a,b,c}	19.4 ^{a,b,c}	22.7 ^{a,b}	0.5
Total PUFA	22.2 ^d	55.5 ^a	34.2 ^{b,c}	38.4 ^b	24.7 ^d	51.3 ^a	32.2 ^c	36.8 ^{b,c}	2.3
<i>n</i> -3/ <i>n</i> -6	3.1 ^a	0.5 ^c	1.5 ^b	1.6 ^b	3.1 ^a	0.6 ^c	1.5 ^b	1.6 ^b	0.2
Chemical composition									
Dry matter (g/kg)	25.5	26.6	25.1	26.0	25.0	24.4	26.1	26.3	0.4
Crude protein	86.2 ^b	88.6 ^{a,b}	89.0 ^{a,b}	88.7 ^{a,b}	89.0 ^{a,b}	91.1 ^a	90.2 ^a	89.0 ^{a,b}	0.4
Total lipid	10.6 ^a	8.1 ^{a,b}	7.8 ^{a,b}	8.6 ^{a,b}	7.7 ^{a,b}	5.9 ^b	6.9 ^{a,b}	8.0 ^{a,b}	0.4
Ash	5.7	5.8	5.8	6.0	5.7	6.0	5.8	5.8	0.0
Gross energy (MJ/kg DM)	23.8 ^a	23.3 ^{a,b}	23.3 ^{a,b}	23.3 ^{a,b}	23.2 ^{a,b}	22.8 ^b	23.0 ^{a,b}	23.3 ^{a,b}	0.1

Data represent the mean ± standard error means of three replicates. Within the same line, different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$).

¹ Includes 15:0, 17:0, 20:0 and 22:0.

² Includes 18:3 *n*-6.

Table 7

Effect of feeding with a wash-out diet of herring oil on rainbow trout growth, nutritive utilization and somatic parameters.

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS	Pooled SEM
Initial weight (g)	617.1	596.9	570.2	577.8	580.1	561.3	535.7	549.7	7.7
Final weight (g)	916.6	949.8	906.4	938.7	815.8	776.2	797.5	782.4	19.0
Weight gain (g)	299.5	352.9	336.2	220.7	235.7	214.9	261.7	232.8	14.9
TGC	0.17	0.20	0.19	0.13	0.14	0.13	0.16	0.14	0.01
FCR	1.33	1.16	1.23	1.29	1.16	1.17	1.29	1.19	0.03
CF	1.58 ^{a,b}	1.64 ^{a,b}	1.65 ^a	1.55 ^{a,b}	1.58 ^{a,b}	1.47 ^b	1.64 ^{a,b}	1.58 ^{a,b}	0.02
HIS	1.06	1.22	1.16	1.17	1.22	1.11	1.21	1.26	0.02
Survival %	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids); TGC, Thermal growth coefficient; FCR, Feed conversion ratio; CF, Condition factor; HIS, Hepato-somatic index. Data represent the mean \pm standard error means of duplicates, except for survival data presented as mean \pm standard deviation of duplicates. Within the same line, different superscripts indicate significant differences due to the diet ($p < 0.05$).

Table 8

Effects of feeding with a wash-out diet of herring oil on fillet composition (g/kg DM) and fatty acid profile (% of total fatty acids).

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS	Pooled SEM
Fatty acid									
14:0	4.4 ^a	3.1 ^b	3.3 ^b	3.3 ^b	3.4 ^{a,b}	2.8 ^b	2.8 ^b	3.0 ^b	0.1
16:0	17.1	17.5	16.6	15.8	18.0	19.7	18.5	19.3	0.4
18:0	3.1 ^c	4.1 ^{a,b}	3.5 ^{b,c}	3.2 ^c	3.7 ^{b,c}	4.8 ^a	4.3 ^{a,b}	4.3 ^{a,b}	0.1
Total SFA ¹	24.6	24.7	23.4	22.3	25.2	27.3	25.6	26.6	0.5
16:1	6.1 ^a	3.7 ^{b,c}	4.3 ^{a,b,c}	3.0 ^c	5.0 ^{a,b}	4.1 ^{b,c}	4.2 ^{b,c}	3.9 ^{b,c}	0.3
18:1	18.4 ^c	20.0 ^c	30.6 ^{a,b}	27.8 ^{a,b,c}	26.8 ^{a,b,c}	21.8 ^{b,c}	31.8 ^a	26.1 ^{a,b,c}	1.3
20:1	11.5 ^a	6.7 ^{b,c}	7.7 ^b	6.4 ^{b,c}	7.5 ^b	5.2 ^c	5.4 ^c	5.2 ^c	0.5
22:1	15.1 ^a	8.5 ^b	9.2 ^b	7.8 ^{b,c}	8.7 ^b	5.7 ^{c,d}	5.3 ^{c,d}	5.2 ^d	0.7
24:1	1.9	0.8	1.1	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.2
Total MUFA	53.0 ^a	36.9 ^{c,d}	53.0 ^a	44.9 ^{a,b,c,d}	48.8 ^{a,b}	36.8 ^d	46.7 ^{a,b,c}	40.5 ^{b,c,d}	1.3
18:2 <i>n</i> -6	5.5 ^b	18.2 ^a	8.0 ^b	8.9 ^b	7.6 ^b	17.2 ^a	9.7 ^b	8.1 ^b	1.0
20:2 <i>n</i> -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20:3 <i>n</i> -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20:4 <i>n</i> -6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22:5 <i>n</i> -6	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	2.2 ^a	0.0 ^b	0.0 ^b	0.0 ^b	2.1 ^a	0.2
Total <i>n</i> -6 ²	5.5 ^d	18.2 ^a	8.0 ^{c,d}	11.1 ^{b,c}	7.6 ^{c,d}	17.2 ^{a,b}	9.7 ^{c,d}	10.2 ^{c,d}	1.0
18:3 <i>n</i> -3	0.0	2.2	1.3	2.0	1.0	1.9	1.2	0.0	0.2
20:5 <i>n</i> -3	2.3	2.1	2.4	1.7	2.5	2.2	2.1	2.5	0.1
22:6 <i>n</i> -3	14.6	13.1	15.4	18.0	14.9	14.6	14.7	20.2	0.6
Total <i>n</i> -3	16.8	17.3	19.1	21.7	18.4	18.7	18.0	22.7	0.6
Total PUFA	22.4 ^c	35.6 ^a	27.2 ^{b,c}	32.8 ^{a,b}	26.0 ^{b,c}	35.9 ^a	27.7 ^{b,c}	32.9 ^{a,b}	1.1
<i>n</i> -3/ <i>n</i> -6	3.0 ^a	1.0 ^b	2.4 ^{a,b}	2.0 ^{a,b}	2.4 ^{a,b}	1.1 ^b	1.8 ^{a,b}	2.2 ^{a,b}	0.2
Chemical composition									
Dry matter (g/kg)	26.6	26.1	25.6	26.1	25.2	25.5	25.5	25.0	0.1
Crude protein	88.0	87.7	90.2	92.8	89.3	90.4	90.1	93.0	0.6
Total lipid	12.0	10.5	9.3	10.1	8.8	8.0	8.8	6.2	0.5
Ash	5.8	5.5	5.3	5.6	5.3	5.7	5.2	5.6	0.1
Gross energy (MJ/kg DM)	24.4	23.7	23.9	23.9	23.6	23.6	23.6	23.3	0.1

Data represent the mean ± standard error means of duplicates replicates. Within the same line, different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$).¹ Includes 15:0, 17:0, 20:0 and 22:0.² Includes 18:3 *n*-6.

Table 9

Apparent digestibility coefficients (ADC) of experimental diets (g/100g TL).

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS	Pooled SEM
Dry matter	72.7 ^b	76.2 ^{a,b}	77.2 ^{a,b}	77.5 ^{a,b}	79.3 ^a	81.4 ^a	82.0 ^a	81.3 ^a	0.7
Crude protein	90.4	91.1	91.4	90.6	90.9	91.6	91.5	91.7	0.2
Total lipid	78.9 ^c	90.3 ^{a,b}	89.0 ^b	89.9 ^{a,b}	89.4 ^b	93.7 ^a	92.8 ^{a,b}	91.5 ^{a,b}	0.9
Gross energy	80.9 ^c	82.1 ^{d,e}	85.2 ^{c,d,e}	85.5 ^{b,c,d,e}	87.4 ^{a,b,c}	86.3 ^{a,b,c,d}	90.3 ^a	90.0 ^{a,b}	0.7

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids); TL, total lipids. Data represent the mean \pm standard deviation of three replicates. Within the same line, different superscripts indicate significant differences due to the diet ($p < 0.05$).

Table 10

Mean ranks of rainbow trout flesh for fish flavour, off-flavour and firmness, evaluated according to the lipid source in the experimental diets. Rank range from 1 to 4: 1, most intense flavour or pronounced firmness; 4, less intense flavour or pronounced firmness.

A

Diet	Fish flavour	Off-flavour	Firmness
18 FO	2.6 ± 1.0	2.2 ± 1.0	2.8 ± 1.0
18 SO	2.2 ± 0.9	2.5 ± 1.0	2.4 ± 1.3
18 CO	2.8 ± 1.3	2.7 ± 1.2	2.4 ± 1.1
18 COS	2.4 ± 1.3	2.6 ± 1.3	2.4 ± 1.2

B

Diet	Fish flavour	Off-flavour	Firmness
25 FO	2.5 ± 1.0	2.9 ± 1.0	2.8 ± 1.0
25 SO	2.7 ± 1.2	2.2 ± 1.1	2.6 ± 1.3
25 CO	2.2 ± 1.1	2.7 ± 1.3	2.6 ± 1.2
25 COS	2.6 ± 1.2	2.3 ± 1.1	2.0 ± 1.0

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids). Data represent the mean rank ± standard deviation of values generated by 19 different judges on a blend of 5 samples/diet at the end of the growth period. There were no differences due to lipid source ($p < 0.05$).

Table 11
Price of raw ingredients of the feeds in 2007 (\$CAN/kg).

Ingredients	Price (\$CAN/kg)
Herring oil	2.42
Soybean oil	0.73
Canola oil	0.65
<i>Schizochytrium</i> sp.	21.1
Blood cell meal AP301	0.78
Corn gluten meal	0.65
Wheat middlings	0.22
Whey	1.10
Herring meal	1.75
Sipernat TM	4.80
CaHPO ₄	20.80
Lysine	2.40
Vitamin/mineral premix	10.00
Carophyll pink premix	57.00

Table 12

Economic parameter results for experimental diets and estimation for an average farm (300 tonnes/year) based on feed composition prices in 2007.

	18 FO	18 SO	18 CO	18 COS	25 FO	25 SO	25 CO	25 COS
FCR	1.19	1.06	1.14	1.09	1.07	1.02	1.05	0.98
Feed cost (CAN\$/kg)	1.61	1.11	1.11	2.96	1.59	1.36	1.35	2.68
ECR (CAN\$/kg)	1.92	1.18	1.26	3.22	1.70	1.39	1.42	2.63
ECR for 300 tonnes/year (CAN\$/kg)	482,965	332,823	332,401	887,393	477,823	409,139	406,077	805,052

18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids); FCR, Feed conversion ratio; ECR, Economic conversion ratio.

Figures

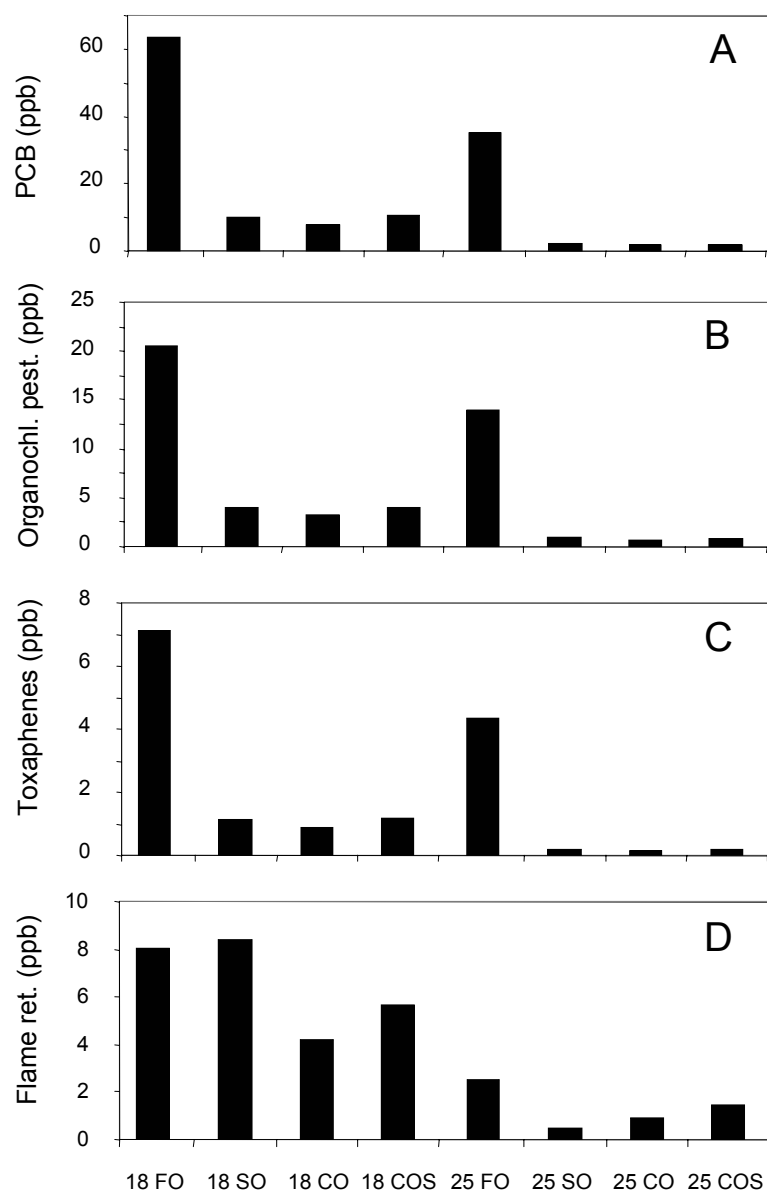


Figure 3. Concentrations of (A) PCBs (ppb), (B) Organochlorine pesticides (ppb), (C) Toxaphenes (ppb) and (D) Flame retardants (ppb) in experimental diets. 18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible lipids).

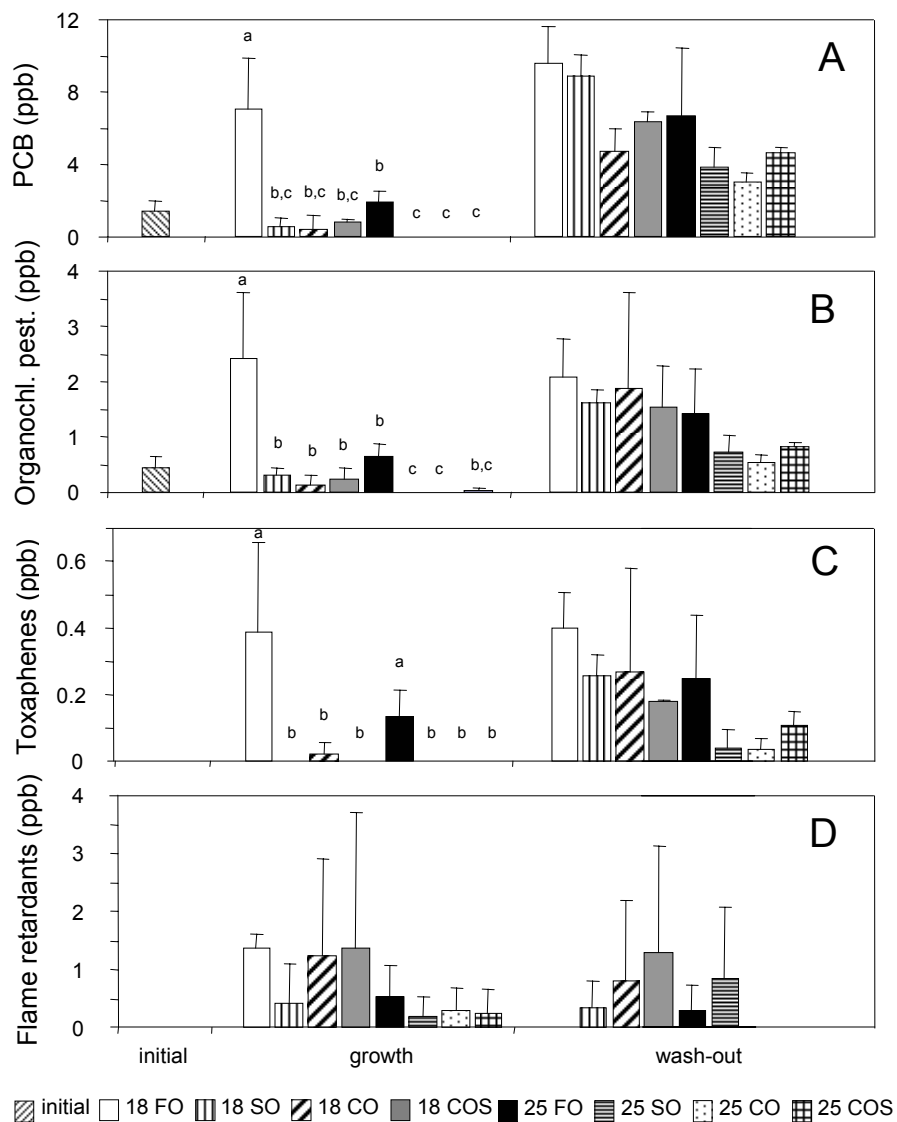


Figure 4. Concentrations of (A) PCBs (ppb), (B) Organochlorine pesticides (ppb), (C) Toxaphenes (ppb) and (D) Flame retardants (ppb) in initial fish, at the end of growth period and at the end of wash-out period. 18 FO, 18 DP/DE diet with 100 % fish oil; 18 SO, 18 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 18 CO, 18 DP/DE diet with 75 % canola oil; 18 COS, 18 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; 24 FO, 24 DP/DE diet with 100 % fish oil; 24 SO, 24 DP/DE diet with 75 % soybean oil; 24 CO, 24 DP/DE diet with 75 % canola oil; 24 COS, 24 DP/DE diet with 75 % blend of canola oil and *Schizochytrium* sp.; DM, dry matter; DP/DE, digestible protein / digestible energy (lipids). Data represent the mean of three replicates for initial data and growth trial; duplicates for wash-out trial. The error bars represent standard errors. Within the growth period, different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$).

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'industrie de l'aquaculture doit répondre à plusieurs problèmes afin de contribuer au développement durable. D'abord, elle doit minimiser l'utilisation de sous-produits de poissons sauvages, tels que l'huile et la farine de poisson, car ces produits sont dispendieux et leur disponibilité est variable. De plus, l'industrie doit réduire l'exposition des ses produits d'élevage aux POPs afin de produire du poisson de qualité qui incitera le consommateur à s'en procurer. Pour répondre à ces objectifs, nous avons orienté notre étude sur le remplacement de 75 % de l'huile de poisson totale, dans la moulée de truite arc-en-ciel, par des huiles végétales. Nous avons donc utilisé de l'huile de soya, de canola et un mélange de canola et d'algues à forte teneur en ADH. Ces huiles ont été combinées à deux ratios DP/DE (18 et 25) afin d'évaluer l'impact de la modification des ratios DP/DE sur le développement des poissons.

Puisque les algues, *Schizochytrium* sp., n'avaient jamais été utilisées directement dans la moulée de truite arc-en-ciel, une étude de digestibilité a été complétée. Notre hypothèse a été confirmée, à savoir que le *Schizochytrium* sp. est un ingrédient hautement digestible, et peut donc compléter les moulées en huiles végétales, faibles en ADH.

L'étude sur les moulées à base d'huile végétale a été divisée en deux période, la période de croissance de 9 mois et la période de finition de 3 mois. Cette dernière a servi à rétablir les niveaux adéquats d'acides gras bénéfiques pour l'homme, grâce à l'utilisation d'une moulée seulement à base d'huile de poisson.

Les moulées végétales ont démontré une forte digestibilité chez la truite arc-en-ciel, tant pour les nutriments que pour les acides gras. La croissance et les paramètres de conditions n'ont pas été influencés par les moulées. L'appétence des poissons n'a pas été modifiée lorsque nourris avec les moulées expérimentales, ce qui indique que le consommateur serait enclin à acheter du poisson carnivore nourris avec des huiles végétales. De plus, la concentration des POPs a significativement diminuée grâce à l'utilisation des huiles

végétales dans la moulée. L'hypothèse initiale a donc été vérifiée pour la période de croissance.

Pendant la période de finition, les niveaux de POPs ont augmentés chez les groupes expérimentaux et n'avaient pas de différence significative avec les groupes témoins. L'hypothèse initiale n'a donc pas été vérifiée, car elle prédisait que les niveaux de POPs chez les groupes nourris avec des huiles végétales resteraient inférieurs aux groupes nourris avec de l'huile de poisson. Cependant, les POPs sont restés très faibles par rapport aux limites recommandées. Les niveaux bénéfiques d'acides gras ont été rétablis chez certains groupes, donc l'hypothèse initiale n'a pas été vérifiée pour l'huile de soya.

Enfin, les moulées végétales sont moins dispendieuses à produire que les moulées végétales, donc les objectifs principaux de l'étude ont été rencontrés par les moulées expérimentales.

Dans les conditions expérimentales utilisées, l'huile de soya n'a pas su répondre au maintien des niveaux de bons acides gras dans les filets, accumulant une trop forte quantité de $n-6$, ce qui s'est directement reflété sur les ratios $n-3/n-6$ qui ont significativement chuté. La période de finition n'a pas su rétablir complètement les niveaux de $n-3/n-6$, donc l'huile de soya ne peut être appropriée pour remplacer 75 % de l'huile de poisson totale dans la moulée de truite arc-en-ciel.

L'huile de canola et le mélange canola et algue ont par contre répondu aux attentes fixées. Après la croissance, les niveaux de $n-3/n-6$ ont diminué par l'augmentation de $n-6$, mais la période de finition a permis de rétablir les concentrations bénéfiques pour la consommation humaine. Il aurait été intéressant d'évaluer le profil de rétablissement des acides gras durant la période de finition afin de déterminer la durée minimale requise pour restaurer les bons niveaux d'acides gras. Les moulées 25 CO et 25 COS rencontrent au mieux les exigences de l'étude, car elles sont les moins concentrées en sous-produits de poissons, ont une forte digestibilité et sont faiblement contaminées. Elles ne modifient pas les paramètres de

croissance, somatiques et sensoriels des poissons et permettent une forte accumulation d'AEP et D'ADH. La moulée 25 CO contribue aussi à réduire les coûts de production. Par contre, l'ajout d'algues dans la moulée 25 COS la rend trop dispendieuse pour être actuellement utilisée industriellement. Nous concluons donc que des études plus poussées doivent être dirigées vers le remplacement de plus de 75 % d'huile de poisson totale par de l'huile de canola, avec et sans *Schizochitrum* sp., dans la moulée de truite arc-en-ciel. Ces études devront combiner une période de croissance et de finition, où des analyses démontrant le patron de rétablissement des acides gras pourraient être effectuées pendant la période de finition. La période de finition minimale requise pourra donc être déterminée afin d'optimiser la réduction d'utilisation de sous-produits de poissons sauvages en aquaculture.

RÉFÉRENCES

ABRIL, R., BARCLAY, W., 1998. Production of docosahexaenoic acid-enriched poultry eggs and meat using an algae-based feed ingredient. The return of ω 3 fatty acids into the food supply. 1. Land-based animal food products and their health effects. Simopoulos, A.P. World Rev. Nutr. Diet., Basel, Karger, 83, 77-88.

ABRIL, R., GARRETT, J., ZELLER, S.G., SANDER, W.J., MAST, R.W., 2003. Safety assessment of DHA-rich microalgae from *Schizochytrium* sp.- Part V : target animal safety/toxicity study in growing swine. Regul. Toxicol. Pharmacol. 37: 73-82.

ALCOCK, R.E., BEHNISCH, P.A., JONES, K.C., HAGENMAIER, H., 1998. Dioxin-like PCBs in the environment - Human exposure and the significance of sources. Chemosphere. 37: 1457-1472.

AOAC, 1990, AOAC official methods of analysis, 15th ed. Association of Official analytical chemists, Washington, DC. Method number 927.05, 930.30.

AOAC, 2000. AOAC official method 996.06. Fat (Total, saturated, and unsaturated) in foods. Hydrolytic extraction gas chromatographic method. AOAC official methods of analysis. Chapter 41, p.20-25.

ARZEL, J., MARTINEZ LOPEZ, F.X., MÉTAILLER, R., STÉPHAN, G., VIAU, M., GANDEMER, G., GUILLAUME, J., 1994. Effect of dietary lipid on growth performance and body composition of brown trout (*Salmo trutta*) reared in seawater. Aquaculture. 123: 361-375.

AWAD, A.B., BEGDACHE, L.A., FINK, C.S., 2000. Effect of sterols and fatty acids on growth and triglyceride accumulation in 3T3-L1 cells. J. Nutr. Biochem. 11: 153-158.

AZEVEDO, P.A., LEESON, S., CHO, C.Y., BUREAU, D.P., 2004. Growth, nitrogen and energy utilization of juveniles from four salmonid species: diet, species and size effects. Aquaculture. 234: 393-414.

AZEVEDO, P.A., VAN MILGEN, J., LEESON, S., BUREAU, D.P., 2005. Comparing efficiency of metabolizable energy utilization by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) using factorial and multivariate approaches. J. Anim. Sci. 83: 842-851.

BAKHSHISH, S.D., HIGGS, D.A., PLOTNIKOFF, M.D., MARKERT, J.R., BUCKLEY, J.T., 1988. Preliminary evaluation of canola oil, pork lard and marine lipid singly and in combination as supplemental dietary lipid sources for juvenile fall Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). Aquaculture. 68: 325-343.

BARCLAY, W., ZELLER, S., 1996. Nutritional enhancement of n-3 and n-6 fatty acids in rotifers and *Artemia nauplii* by feeding spray-dried *Schizochytrium* sp. *JWAS*. 27: 314-322.

BARCLAY, W., ABRIL, R., ABRIL, P., WEAVER, C., ASHFORD, A., 1998. Production of docosahexaenoic acid from microalgae and its benefits for use in animal feeds. The return of ω 3 fatty acids into the food supply. 1. Land-based animal food products and their health effects. Simopoulos, A.P. *World Rev. Nutr. Diet.*, Basel, Karger, 83, 61-76.

BARCLAY, W.R., 1992. Process for the heterotrophic production of microbial products with high concentrations of omega-3 highly unsaturated fatty acids. U.S. Patent 5,130,242. United States Patent and Trademark Office, Washington, DC.

BELL, J.G., DICK, J.R., SARGENT, J.R., 1993. Effect of diets rich in linoleic or α -linolenic acid on phospholipid fatty acid composition and eicosanoid production in atlantic salmon (*Salmo salar*). *Lipids*. 28: 819-826.

BELL, J.G., MCGHEE, F., CAMPBELL, P.J., SARGENT, J.R., 2003. Rapeseed oil as an alternative to marine fish oil in diets of post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*): changes in flesh fatty acid composition and effectiveness of subsequent fish oil "wash out". *Aquaculture*. 218: 515-528.

BELL, J.G., MCGHEE, F., DICK, J.R., TOCHER, D.R., 2005. Dioxin and dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCBs) in Scottish farmed salmon (*Salmo salar*): effects of replacement of dietary marine fish oil with vegetable oils. *Aquaculture*. 243: 305-314.

BELL, J.G., DICK, J.R., MCVICAR, A.H., SARGENT, J.R., THOMPSON, K.D., 1993. Dietary sunflower, linseed and fish oils affect phospholipid fatty acid composition, development of cardiac lesions, phospholipase activity and eicosanoid production in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 49: 665-673.

BELL, J.G., ASHTON, I., SECOMBES, C.J., WEITZEL, B.R., DICK, J.R., 1996. Dietary lipid affects phospholipid fatty acid compositions, eicosanoid production and immune function in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 54: 173-182.

BELL, J.G., MCEVOY, J., TOCHER, D.R., MCGHEE, F., CAMPBELL, P.J., SARGENT, J.R., 2001. Replacement of fish oil with rapeseed oil in diets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects tissue lipid compositions and hepatocyte fatty acid metabolism. *Nutr. Metab.* 131: 1535-1543.

BELL, J.G., HENDERSON, R.J., TOCHER, D.R., MCGHEE, F., DICK, J.R., PORTER, A., SMULLEN, R.P., SARGENT, J.R., 2002. Substituting fish oil with crude palm oil in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects muscle fatty acid composition and hepatic fatty acid metabolism. *J. Nutr.* 132: 222-230.

BELLUZZI, A., BRIGNOLA, C., CAMPIERI, M., PERA, A., BOSCHI, S., MIGLIOLI, M., 1996. Effect of an enteric-coated fish-oil preparation on relapses in Crohn's disease. *N. Engl. J. Med.* 334: 1557-1560.

BERG, O.K., BREMSET, G., 1998. Seasonal changes in the body composition of young riverine Atlantic salmon and brown trout. *J. Fish Biol.* 52: 1272-1288.

BERNTSSEN, M.H.G., LUNDEBYE, A.-K., TORSTENSEN, B.E., 2005. Reducing the levels of dioxins and dioxin-like PCBs in farmed Atlantic salmon by substitution of fish oil with vegetable oil in the feed. *Aquac. Nutr.* 11: 219-231.

BERTAZZI, P.A., CONSONNI, D., BACHETTI, S., RUBAGOTTI, M., BACCARELLI, A., ZOCCHETTI, C., PESATORI, A.C., 2001. Health effects of dioxin exposure: A 20-year mortality study. *Am. J. Epidemiol.* 153: 1031-1044.

BIMBO, A.P., 1990. Production of fish oil. *Fish oils in nutrition*. Stansby, M.E. (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 141-180.

BLANCHET, C., LUCAS, M., DEWAILLY, É. 2005. Analyses des acides gras oméga-3 et des contaminants environnementaux dans les salmonidés. Unité de recherche en santé publique, Centre de Recherche du Pavillon du CHUL, Québec, Qc, 1-47.

BOEHM, G., BORTE, M., BÖHLES, H.J., MÜLLER, H., KOHN, G., MORO, G., 1996. Docosahexaenoic and arachidonic acid content of serum and red blood cell membrane phospholipids of preterm infants fed breast milk, standard formula or formula supplemented with n-3 and n-6 long-chain polyunsaturated fatty acids. *Eur. J. Pediatr.* 155: 410-416.

BOEING, P., 1997. Use of pray-dried *Schizochytrium* sp. as a partial algal replacement for juvenile bivalves. *J. Shellfish Res.* 16: 284.

BOGGIO, S.M., HARDY, R.W., BABBIT, J.K., BRANNON, E.L., 1985. The influence of dietary lipid source and alpha-tocopheryl acetate level on product quality rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aquaculture.* 51: 13-24.

BONEFELD-JØRGENSEN, E.C., 2004. The Human Health Effect Programme in Greenland, a review. *Sci. Total Environ.* 331: 215-231.

BRANCHI, I., CAPONE, F., ALLEVA, E., COSTA, L.G., 2003. Polybrominated diphenyl ethers: neurobehavioral effects following developmental exposure. *Neurotoxicology.* 24: 449-462.

BRANDSEN, M.P., CARTER, G.C., NICHOLS, P.D., 2003. Replacement of fish oil with sunflower oil in feeds for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): effect on growth performance, tissue fatty acid composition and disease resistance. *Comp. Bioch. Physiol. Part B.* 135: 611-625.

BUREAU, D.P., HUA, K., HARRIS, A.M., 2007. The effect of dietary lipid and long-chain n-3 PUFA levels on growth, energy utilization, carcass quality and immune function of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *JWAS. Article soumis.*

BUREAU, D.P., HARRIS, A.M., CHO, C.Y., 1999. Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 180: 345-358.

BURR, M.L., FEHILY, A.M., GILBERT, J.F., ROGERS, S., HOLLIDAY, R.M., SWEETNAM, P.M., ELWOOD, P.C., DEADMAN, N.M., 1989. Effects of changes in fat, fish, and fibre intake on death and myocardial reinfarction: diet and reinfarction trial (DART). *Lancet*. 2: 757-761.

BUZZI, M., HENDERSON, R.J., SARGENT, J.R., 1996. The desaturation and elongation of linolenic acid and eicosapentaenoic acid by hepatocytes and liver microsomes from Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets containing fish oil or olive oil. *Biochim. Biophys. Acta*. 1299: 235-244.

CABALLERO, M.J., OBACH, A., ROSENLUND, G., MONTERO, D., GISVOLD, M., IZQUIERO, M.S., 2002. Impact of different dietary lipid sources on growth, lipid digestibility, tissue fatty acid composition and histology of Rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*. 214: 253-271.

CASSIDY, M., MATU, A., DOWNING, G., 2002. Baseline risk study of potential chemical contaminants in Ontario farm-raised rainbow trout. [En ligne] <http://www.aps.uoguelph.ca/~aquacentre/aec/publications/contaminants.pdf>. 01-03-2007

CHAPMAN, M.J., 1980. Animal lipoproteins : chemistry, structure, and comparative aspects. *J. Lipid Res*. 21: 789-853.

CHARNOV, E.L., TURNER, T.F., WINEMILLER, K.O., 2001. Reproductive constraints and the evolution of life histories with indeterminate growth. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 98: 9460-9464.

CHO, C.Y., SLINGER, S.J., 1979. Apparent digestibility measurement in feedstuffs for rainbow trout. *Proc. World Symp. on Finfish Nutrition and Fishfeed Technology*. Berlin, 2, 239-247.

CHO, C.Y., KAUSHIK, S.J., 1990. Nutritional energetics in fish: energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aspects of food production, consumption and energy values*. World Rev. Nutr. Diet. Bourne GH (ed), Basel, Karger, 61, 132-172.

CHO, C.Y., BAYLEY, H.S., S.J., SLINGER, 1974. Partial replacement of herring meal with soybean meal and other changes in a diet for rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish. Res. Board Can.* 31: 1523-1528.

CHO, C.Y., SLINGER, S.J., BAYLEY, H.S., 1982. Bioenergetics of salmonid fishes : Energy intake, expenditure and productivity. *Comp. Biochem. Physiol.* 73B: 25-41.

CLARKE, S.D., JUMP, D.B., 1994. Dietary polyunsaturated fatty acid regulation of gene transcription. *Annu. Rev. Nutr.* 14: 83-98.

CONNOR, W.E., NEURINGER, M., REISBICK, S., 1991. Essentiality of ω 3 fatty acids : Evidence from the primate model and implications for human nutrition. Health effects of ω 3 polyunsaturated fatty acids in seafoods. Simopoulos, A.P., Kifer, R.R., Martin, R.E. , Barlow, S.M. *World Rev. Nutr. Diet*, Basel, Karger, 66, 118-132.

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DES RESSOURCES ET DE L'ENVIRONNEMENT, 1986. La question des BPC. [En ligne] www.ec.gc.ca. 1-36.

COOKE, P.S., ZHAO, Y.-D., HANSEN, L.G., 1996. Neonatal polychlorinated biphenyl treatment increases adult testis size and sperm production in the rat. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 136: 112-117.

CORSOLINI, S., ADEMOLLO, N., ROMEO, T., GRECO, S., FOCARDI, S., 2005. Persistent organic pollutants in edible fish : a human and environmental health problem. *Microchem. J.* 79: 115-123.

CRAWFORD, M.A., 1968. Fatty-acid ratios in free-living and domestic animals : Possible implications for atheroma. *Lancet.* 291: 1329-1333.

DAHLEN, S.-E., BJORK, J., HEDQVIST, P., ARFORS, K.-E., HAMMARSTROM, S., LINDGREN, J.-A., SAMUELSSON, B., 1981. Leukotrienes promote plasma leakage and leukocyte adhesion in post capillary venules: In vivo effects with relevance to the acute inflammatory response. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 78: 3887-3891.

DAS, U.N., VIJAYKUMAR, K., MADHAVI, N., SURYAPRABHA, P., SRAVANKUMAR, G., RAMESH, G., KORATKAR, R., SANGEETHA SAGAR, P., PADMA, M., 1992. Psoriasis : Current concepts and new approaches to therapy. *Med. Hyp.* 38: 56-62.

DAY, T., TAYLOR, P.D., 1997. Von Bertalanffy's growth equation should not be used to model age and size at maturity. *Am. Nat.* 149: 381-393.

DE CATERINA, R., CYBULSKY, M.I., CLINTON, S.K., GIMBRONE JR, M.A., LIBBY, P., 1994. The omega-3 fatty acid docosahexaenoate reduces cytokine-induced expression of proatherogenic and proinflammatory proteins in human endothelial cells. *Arterioscler. Thromb.* 14: 1829-1836.

DE CATERINA, R., CAPRIOLI, R., GIANNESI, D., SICARI, R., GALLI, C., LAZZERINI, G., BERNINI, W., CARR, L., RINDI, P., 1993. n-3 fatty acids reduce proteinuria in patients with chronic glomerular disease. *Kidney Int.* 44: 843-850.

DEPLANO, M., DIAZ, J.P., CONNES, R., KENTOURIDIVANACH, M., CAVALIER, F., 1991. Appearance of lipid-absorption capacities in larvae of the sea bass *Dicentrarchus labrax* during transition to the exotrophic phase. *Mar. Biol.* 108: 361-371.

DUMAS, A., FRANCE, J., BUREAU, D.P., 2007. Evidence of three growth stanzas in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) across life stages and adaptation of the thermal-unit growth coefficient. *Aquaculture*. doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.1001.1041.

DYERBERG, J., LEAF, A., GALLI, C., SIMOPOULOS, A.P., ACKMAN, R.G., CRAWFORD, M., DE CATERINA, R., HORNSTRA, G., INNIS, S., KARYADI, D., KOLETZKO, B., LAGARDE, M., LEIGHTON, F., MARTIN, R., MARTINÉZ, M., NESTEL, P., NORDØY, A., RENAUD, S., SPECTOR, A., TAMURA, Y., UAUY, R., 1995. ISSFAL board statement: Recommendations for the essential fatty acid requirement for infant formulas. *J. Am. Coll. Nutr.* 14: 213-214.

EINEN, O., ROEM, A.J., 1997. Dietary protein/energy ratios for Atlantic salmon in relation to fish size: growth, feed utilization and slaughter quality. *Aquac. Nutr.* 3: 115-126.

FAO, 2000. The state of world fisheries and aquaculture. Rome: 160 pp.

FAO, 2004. Global aquaculture production 1950-2004 - Fisheries statistics (FIGIS). [En ligne] www.fao.org/figis/servlet/TabSelector. 2007-03-15

FAO, 2007. The state of world fisheries and aquaculture 2006. Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. [En ligne] <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0699e/a0699e.pdf>. Rome, 180 pp.

FAQI, A.S., DALSENER, P.R., MERKER, H.-J., CHAHOUD, I., 1998. Reproductive toxicity and tissue concentrations of low doses of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin in male offspring rats exposed throughout pregnancy and lactation. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 150: 383-392.

FISCHER, D., HOOPER, K., ATHANASIADOU, M., ATHANASSIADIS, I., BERGMAN, A., 2006. Children show highest levels of polybrominated diphenyl ethers in a California family of four: A case study. *Envir. Health Perspect.* 114: 1581-1584.

FROYLAND, L., LIE, O., BERGE, R.K., 2000. Mitochondrial and peroxisomal beta-oxidation capacities in various tissues from Atlantic salmon *Salmo salar*. *Aquac. Nutr.* 6: 85-89.

GRABER, R., SUMIDA, C., NUNEZ, E.A., 1994. Fatty acids and cell signal transduction. *J. Lipid Mediators Cell Signalling.* 9: 91-116.

GREENE, D.H.S., SELIVONCHICK, D.P., 1987. Lipid metabolism in fish. *Prog. Lipid Res.* 26: 53-85.

GREENE, D.H.S., SELIVONCHICK, D.P., 1990. Effects of dietary vegetable, animal and marine lipids on muscle lipid and hematology of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 89: 165-182.

GRISDALE-HELLAND, B., HELLAND, S.J., 1997. Replacement of protein by fat and carbohydrate in diets for atlantic salmon (*Salmo salar*) at the end of the freshwater stage. *Aquaculture*. 152: 167-180.

GRISDALE-HELLAND, B., RUYTER, B., ROSENLUND, G., OBACH, A., HELLAND, S.J., SANDBERG, M.G., STANDAL, H., RØSJØ, C., 2002. Influence of high contents of dietary soybean oil on growth, feed utilization, tissue fatty acid composition, heart histology and standard oxygen consumption of Atlantic salmon (*Salmo salar*) raised at two temperatures. *Aquaculture*. 207: 311-329.

GUILLETTE, L.J., PICKFORD, D.B., CRAIN, D.A., ROONEY, A.A., PERCIVAL, H.F., 1996. Reduction in penis size and plasma testosterone concentrations in juvenile alligators living in a contaminated environment. *Gen. Comp. Endocrin.* 101: 32-42.

GUILLETTE, L.J., GROSS, T.S., MASSON, G.R., MATTER, J.M., PERCIVAL, H.F., WOODWARD, A.R., 1994. Developmental abnormalities of the gonad and abnormal sex hormone concentrations in juvenile alligators from contaminated and control lakes in Florida. *Envir. Health Perspec.* 102: 680-689.

GUILLOU, A., SOUCY, P., KHALIL, M., ADAMBOUNOU, L., 1995. Effects of dietary vegetable and marine lipid on growth, muscle fatty acid composition and organoleptic quality of flesh of Brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Aquaculture*. 136: 351-362.

GULATI, S.K., MAY, C., WYNN, P.C., SCOTT, T.W., 2002. Milk fat enriched in *n*-3 fatty acids. *Animal Feed Sci. Technol.* 98: 143-152.

HAMMOND, B.G., MAYHEW, D.A., KIER, L.D., MAST, R.W., SANDER, W.J., 2002. Safety assessment of DHA-rich microalgae from *Schizochytrium* sp. IV. Mutagenicity studies. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 35: 255-265.

HARDY, R.W., SCOTT, T.M., HARRELL, L.W., 1987. Replacement of herring oil with menhaden oil, soybean oil, or tallow in the diet of Atlantic salmon raised in marine net-pens. *Aquaculture*. 65: 267-277.

HARRISON, N., WEARNE, S., DE M. GEM, M.G., GLEADLE, A., STARTIN, J., THORPE, S., WRIGHT, C., KELLY, M., ROBINSON, C., WHITE, S., HARDY, D., EDINBURGH, V., 1998. Time trends in human dietary exposure to PCDDs, PCDFs and PCBs in the UK. *Chemosphere*. 37: 1657-1670.

HELLAND, S.J., GRISDALE-HELLAND, B., 1998. The influence of replacing fish meal in the diet with fish oil on growth, feed utilization and body composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) during the smoltification period. *Aquaculture*. 162: 1-10.

HENDERSON, R.J., 1996. Fatty acid metabolism in freshwater fish with particular reference to polyunsaturated fatty acids. *Arch. Anim. Nutr.* 49: 5-22.

HIBBELN, J.R., 1998. Fish consumption and major depression. *Lancet.* 351: 1213.

HILLESTAD, M., JOHNSEN, F., 1994. High-energy/low-protein diets for Atlantic salmon: effects on growth, nutrient retention and slaughter quality. *Aquaculture.* 124: 109-116.

HIRAI, A., TERANO, T., MAKUTA, H., OZAWA, A., FUJITA, T., TAMUARA, Y., YOSHIDA, S., 1989. Effect of oral administration of highly purified eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid on platelet function and serum lipids in hyperlipidemic patients. *Adv. Prostagl., Thromb. Leuk.* 19: 627-630.

HITES, R.A., FORAN, J.A., CARPENTER, D.O., HAMILTON, M.C., KNUTH, B.A., SCHWAGER, S.J., 2004. Global assessment of organic contaminants in farmed salmon. *Science.* 303: 226-229.

HORROCKS, L.A., YEO, Y.K., 1999. Health benefits of docosahexaenoic acid (DHA). *Pharmacol. Research.* 40: 211-225.

HSU, P.-C., LI, M.-H., GUO, Y.L., 2003. Postnatal exposure of 2,2',3,3',4,6'-hexachlorobiphenyl and 2,2',3,4',5',6-hexachlorobiphenyl on sperm function and hormone levels in adult rats. *Toxicology.* 187: 117-126.

INDU, M., GHAFOORUNISSA, 1992. n-3 fatty acids in Indian diets - Comparison of the effects of precursor (alpha-linolenic acid) vs product (long chain n-3 polyunsaturated fatty acids). *Nutr. Research.* 12: 569-582.

IZQUIERDO, M.S., SOCORRO, J., ARANTZAMENDI, L., HERNANDEZ-CRUZ, C.M., 2000. Recent advances in lipid nutrition in fish larvae. *Fish Physiol. Biochem.* 22: 97-107.

IZQUIERDO, M.S., MONTERO, D., ROBAINA, L., CABALLERO, M.J., ROSENLUND, G., GINÉS, R., 2005. Alterations in fillet fatty acid profile and flesh quality in gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed vegetable oils for a long term period. Recovery of fatty acid profiles by fish oil feeding. *Aquaculture.* 250: 431-444.

JACOBSON, J.L., JACOBSON, S.W., 1997. Evidence for PCBs as neurodevelopmental toxicants in humans. *Neurotoxicology.* 18: 415-424.

JOHNSEN, R.I., GRAHL-NIELSEN, O., ROEM, A., 2000. Relative absorption of fatty acids by Atlantic salmon *Salmo salar* from different diets, as evaluated by multivariate statistics. *Aquac. Nutr.* 6: 255-261.

KARP, G.C., 2004. *Biologie cellulaire et moléculaire.* Éditions De Boeck Université, Bruxelles, Belgique, p.141.

KREMEN, A.J., LINNER, J.H., NELSON, C.H., 1954. An experimental evaluation of the nutritional importance of proximal and distal small intestine. *Ann. Surg.* 140: 439-448.

KIM, I.S., 2001. Effects of exposure of lactating female rats to polychlorinated biphenyls (PCBs) on testis weight, sperm production and sertoli cell numbers in the adult male offspring. *J. Vet. Med. Sci.* 63: 5-9.

KOGEVINAS, M., 2001. Human health effects of dioxins: cancer, reproductive and endocrine system effects. *Human Reprod. Update.* 7: 331-339.

KOSHIO, S., ACKMAN, R.G., LALL, S.P., 1994. Effects of oxidized herring and canola oils in diets on growth, survival, and flavor of Atlantic salmon, *Salmo salar*. *J. Agric. Food Chem.* 42: 1164-1169.

KROGDAHL, A., SUNDBY, A., OLLI, J.J., 2004. Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) digest and metabolize nutrients differently. Effects of water salinity and dietary starch level. *Aquaculture.* 229: 335-360.

LAMBERT, M.R., JACOBSON, N.L., ALLEN, R.S., ZALETEL, J.H., 1954. Lipid deficiency in the calf. *J. Nutrition.* 52: 259-272.

LANARI, D., D'AGARO, E., BALLESTRAZZI, R., 1995. Effect of dietary DP/DE ratio on apparent digestibility, growth and nitrogen and phosphorus retention in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquac. Nutr.* 1: 105-110.

LANGDON, C., ÖNAL, E., 1999. Replacement of living microalgae with spray-dried diets for the marine mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Aquaculture.* 180: 283-294.

LIN, P., CHANG, Y.-C., CHEN, C.-H., YANG, W.-J., CHENG, Y.-H., CHANG, L.W., 2004. A comparative study on the effects of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin polychlorinated biphenyl 126 and estrogenin human bronchial epithelial cells. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 195: 83-91.

LEASE, E.J., LEASE, J.G., WEBER, J. STEENBOCK, H., 1938. Destruction of vitamin A by rancid fats. *J. Nutrition.* 16: 571-583.

LOPEZ-ESPINOSA, M.-J., GRANADA, A., CARRENO, J., SALVATIERRA, M., OLEA-SERRANO, F., OLEA, N., 2006. Organochlorine pesticides in placentas from Southern Spain and some related factors. *Placenta.* doi:10.1016/j.placenta.2006.1009.1009.

LORENZ, S.G., VAN ELSWYK, M.E., 1997. Chicken breast meat as a food-based supplement for dietary n-3 fatty acid. *J. Am. Diet Assoc.* 97: A97.

LONGENECKER, H.E., MATTIL, K.F., 1942. Glyceride structure of rat body fats. - Presented 29th annual meeting of federation of american societies for experimental biology, Boston.

LYMAN, J.F., 1917. Metabolism of fats. 1. Utilization of palmitic acid, glyceryl palmitate and ethyl palmitate by the dog. *J. Biology. Chem.* 32: 7-11.

LYNCH, M.J., STANLEY, S., RAPHAEL, L.D., MELLOR, P.D., SPARE, P., HILLS, P., INWOOD, J.M., 1963. *Medical Laboratory Technology*. W.B. Saunders company, Philadelphia and London.

MACHLIN, L.J., GORDON, R.S., MEISKY, K.A, MADDLY, K.H., 1959 Relationship of oxidase degradation to toxicity in certain fats. *Poultry Sci.* 38: 579-585.

MAGUIRE, R.J., SIBLEY, P.K., SOLOMON, K.R., DELORME, P., 2003. 3. Pesticides. [En ligne] <http://www.nwri.ca/threatsfull/ch3-1-f.html>.

MCLENNAN, P., HOWE, P., ABEYWARDENA, M., MUGGLI, R., RAEDERSTORFF, D., MANO, M., RAYNER, T., HEAD, R., 1996. The cardiovascular protective role of docosahexaenoic acid. *Eur. J. Pharmacol.* 300: 83-89.

MEEKER, J.D., ALTSHUL, L., HAUSER, R., 2007. Serum PCBs, *p,p'*-DDE and HCB predict thyroid hormone levels in men. *Envir. Resarch.* doi:10.1016/j.envres.2006.1011.1007.

MEIRONYTÉ GUVENIUS, D., NORÉN, K., BERGMAN, A., 1999. Organohalogen contaminants in human with emphasis on polybrominated diphenyl ethers. *J. Toxicol. Environ. Health Part A.* 58: 329-341.

MEIRONYTÉ GUVENIUS, D., BERGMAN, A., NORÉN, K., 2001. Polybrominated diphenyl ethers in Swedish human liver and adipose tissue. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 40: 564-570.

MENOYO, D., LOPEZ-BOTE, C.J., BAUTISA, J.M., 2005. Effect of dietary fish oil substitution with linseed oil on the performance, tissue fatty acid profile, metabolism, and oxidative stability of Atlantic salmon. *J. Anim. Sci.* 83: 2853-2862.

MENOYO, D., LOPEZ-BOTE, CLEMENTE J., BAUTISA, JOSÉ M., OBACH, ALEX, 2003. Growth, digestibility and fatty acid utilization in large Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed varying levels of n-3 saturated fatty acids. *Aquaculture.* 225: 295-307.

MYERS, G.J., DAVIDSON, P.W., COX, C., SHAMLAYE, C., CERNICHIARI, E., CLARKSON, T.W., 1999. Twenty-seven years studying the human neurotoxicity of methylmercury exposure. *Envir. Research Sect. A.* 83: 275-285.

NAGAYAMA, J., TSUJI, H., IIDA, T., HIRAKAWA, H., MATSUEDA, T., OKAMURA, K., HASEGAWA, M., SATO, K., MA, H.-Y., YANAGAWA, T., IGARASHI, H., FUKUSHIGE, J., WATANABE, T., 1998. Postnatal exposure to chlorinated dioxins and related chemicals on lymphocyte subsets in Japanese breast-fed infants. *Chemosphere.* 37: 1781-1787.

NAKAMURA, M.T., NARA, T.Y., 2003. Essential fatty acid synthesis and its regulation in mammals. *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 68: 145-150.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 1993. Nutrient requirements of fish. National Academy Press, Washington DC.

NESTLER, J.E., CLORE, J.N., BLACKARD, W.G., 1991. Metabolism and actions of dehydroepiandrosterone in humans. *J. Steroid Biochem. Molec. Biol.* 40: 599-605.

NETTLETON, J.A., KATZ, R., 2005. n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in type 2 diabetes : A review. *J. Am. Diet Assoc.* 105: 428-440.

NG, W.-K., SIGHOLT, T., BELL, J.G., 2004. The influence of environmental temperature on the apparent nutrient and fatty acid digestibility in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed finishing diets containing different blends of fish oil, rapeseed oil and palm oil. *Aquaculture Res.* 35: 1228-1237.

NG, W.-K., CAMPBELL, P.J., DICK, J.R., BELL, J.G., 2003. Interactive effects of dietary palm oil concentration and water temperature on lipid digestibility in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Lipids*. 38: 1031-1038.

NORÉN, K., MEIRONYTÉ, D., 2000. Certain organochlorine and organobromine contaminants in Swedish human milk in perspective of past 20-30 years. *Chemosphere*. 40: 111-1123.

NUERNBERG, K., FISCHER, K., NUERNBERG, G., KUECHENMEISTER, U., KLOSOWSKA, D., ELIMINOWSKA-WENDA, G., FIEDLER, I., ENDER, K., 2005. Effects of dietary olive and linseed oil on lipid composition, meat quality, sensory characteristics and muscle structure in pigs. *Meat Sci.* 70: 63-74.

OLSEN, R.E., MYKLEBUST, R., RINGØ, E., MAYHEW, T.M., 2000. The influence of dietary linseed oil and saturated fatty acids on caecal enterocytes in Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) : a quantitative ultrastructural study. *Fish Physiol. and Biochem.* 22: 207-216.

OLSEN, R.E., HENDERSON, R.J., SOUNTAMA, J., HEMRE, G.-I., RINGØ, MELLE, W., TOCHER, D.R., 2004. Atlantic salmon, *Salmo salar*, utilizes wax ester-rich oil from *Calanus finmarchicus* effectively. *Aquaculture*. 240: 433-449.

PEAKALL, D.B., LINCER, J.L., RISEBROUGH, R.W., PRITCHARD, J.B., KINTER, W.B., 1973. DDE-induced egg-shell thinning: structural and physiological effects in three species. *Comp. Gen. Pharmac.* 4: 305-313.

PEAT, J.K., SALOME, C.M., WOOLCOCK, A.J., 1992. Factors associated with bronchial hyperresponsiveness in Australian adults and children. *Eur. Resp. J.* 5: 921-929.

PIEDECAUSA, M.A., MAZÓN, M.J., GARCÍA GARCÍA, B., HERNÁNDEZ, M.D., 2006. Effects of total replacement of fish oil by vegetable oils in the diets of sharpsnout seabream (*Diplodus puntazzo*). *Aquaculture*. 263: 211-219.

RAES, K., DE SMET, S., DEMEYER, D., 2004. Effect of dietary fatty acids on incorporation of long chain polyunsaturated fatty acids and conjugated linoleic acid in lamb, beef and pork meat : a review. *Animal Feed Sci. Technol.* 113: 199-221.

RASMUSSEN, R.S., OSTENFELD, T.H., 2000. Effect of growth rate on quality traits and feed utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Aquaculture*. 184: 327-337.

RATLEDGE, C., 2004. Fatty acid biosynthesis in microorganisms being used for single cell oil production. *Biochimie*. 86: 807-815.

REFTIE, S., KORSØEN, Ø.J.K., STOREBAKKEN, T., BAEVERFJORD, G., LEIN, I., ROEM, A.J., 2000. Differing nutritional responses to dietary soybean meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*. 190: 49-63.

REGOST, C., ARZEL, J., ROBIN, J., ROSENLUND, G., KAUSHIK, S.J., 2003. Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in Turbot (*Psetta maxima*) 1. Growth performance, flesh fatty acid profile, and lipid metabolism. *Aquaculture*. 217: 465-482.

RICHARDSON, A.J., 2004. Clinical trials of fatty acid treatment in ADHD, dyslexia, dyspraxia and the autistic spectrum. *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 70: 383-390.

RITTER, J.M., TAYLOR, G.W., 1988. Fish oil in asthma. *Thorax*. 43: 81-83.

ROBERTSON, J.A., 1972. Sunflowers: America's neglected crop. *J. Am. Oil Chemist' Soc.* 49: 239-244.

ROBIN, J.H., REGOST, C., ARZEL, J., KAUSHIK, S.J., 2003. Fatty acid profile of fish following a change in dietary fatty acid source: model of fatty acid composition with a dilution hypothesis. *Aquaculture*. 225: 283-293.

RONSHOLDT, B., 1995. Effect size/age and feed composition on body composition and phosphorus content of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Water Sci. Technol.* 31: 175-183.

ROSENLUND, G., OBACH, A., SANDBERG, M.G., STANDAL, H., TVEIT, K., 2001. Effect of alternative lipid sources on long-term growth performance and quality of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture Res.* 32: 323-328.

ROULET, M., FRASCAROLO, P., RAPPAZ, I., PILET, M., 1997. Essential fatty acid deficiency in well nourished young cystic fibrosis patients. *Eur. J. Pediatr.* 156: 952-956.

- ROZMAN, K.K., LEBOSKY, M., PINSON, D.M., 2005. Chronic toxicity and carcinogenicity of 1,2,3,4,6,7,8-heptachlorodibenzo-*p*-dioxin displays a distinct dose/time toxicity threshold ($c \times t = k$) and a life-prolonging subthreshold effect. *Food Chem. Toxicol.* 43: 729-740.
- RUOHONEN, K., VIELMA, J., GROVE, D.J., 1998. Growth and food utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low-fat herring and dry diets enriched with fish oil. *Aquaculture.* 168: 275-283.
- SANTÉ CANADA ET ACIA, 2002. Études sur les poissons et les fruits de mer. [En ligne] http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/surveill/other-autre/fish-poisson/index_f.html. 2004-09-13.
- SARGENT, J., BELL, G., MCEVOY, L., TOCHER, D., ESTEVEZ, A., 1999. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish. *Aquaculture.* 177: 191-199.
- SARGENT, J.R., TOCHER, D.R., BELL, J.G., 2002. Fish nutrition. The lipids. Halver, J.E., Hard, R.W., (ed.). Academic Press, London,
- SCHECTER, A., PAVUK, M., PÄPKE, O., RYAN, J.J., BIRNBAUM, L., ROSEN, R., 2003. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in U.S. mother's milk. *Envir. Health Perspect.* 111: 1723-1729.
- SHEPPARD, A.J., IVERSON, J.L., WEIHRAUCH, J.L., 1978. Fatty acids and glycerides. *Handbook of Lipid Research.* 1. Anis Kuksis ed., Plenum Press, New York, 341-379.
- SIGURGISLADOTTIR, S., LALL, S.P., PARRISH, C.C., ACKMAN, R.G., 1992. Cholestane as a digestibility marker in the absorption of polyunsaturated fatty acid ethyl esters in Atlantic salmon. *Lipids.* 27: 418-424.
- SIMOPOULOS, A.P., 1995. Evolutionary aspects of diet: Fatty acids, insulin resistance and obesity. *Obesity: New directions in assessment and management.* Vanitallie, T.B., Simopoulos, A.P. Charles Press, Philadelphie, PA, É.-U., 241-261.
- SIMOPOULOS, A.P., 1999. Essential fatty acids in health and chronic disease. *Am. J. Clin. Nutr.* 70: 560S-590S.
- SIMOPOULOS, A.P., 2000. Human requirement for n-3 polyunsaturated fatty acids. *Poultry Sci.* 79: 961-970.
- SIMOPOULOS, A.P., 2001. n-3 fatty acids and human health: defining strategies for public policy. *Lipids.* 36: S83-S89.
- SIMOPOULOS, A.P., SALEM JR., N., 1992. Egg yolk as a source of long-chain polyunsaturated fatty acids in infant feeding. *Am. J. Clin. Nutr.* 55: 411-414.
- SINCLAIR, H.M., 1952. Essential fatty acids and their relation to pyridoxine. *Biochem. Soc. Symp.* 9: 80-99.

SISCOVICK, D.S., RAGHUNATHAN, T.E., KING, I., WEINMANN, S., WICKLUND, K.G., ALBRIGHT, J., BOVBJERG, V., ARBOGAST, P., SMITH, H., KUSHI, L.H., COBB, L.A., COPASS, M.K., PSATY, B.M., LEMAITRE, R., RETZLAFF, B., CHILDS, M., KNOPP, R.H., 1995. Dietary intake and cell membrane levels of long-chain n-3 polyunsaturated fatty acids and the risk of primary cardiac arrest. *JAMA*. 274: 1363-1367.

STEFFENS, W., RENNERT, B., WIRTH, M., KRÜGER, R., 1999. Effect of two lipid levels on growth, feed utilization, body composition and some biochemical parameters of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum 1792). *J. Appl. Ichthyol.* 15: 159-164.

STEVENS, L.J., ZENTALL, S.S., DECK, J.L., ABATE, M.L., WATKINS, B.A., LIPP, S.R., BURGESS, J.R., 1995. Essential fatty acid metabolism in boys with attention-deficit hyperactivity disorder. *Am. J. Clin. Nutr.* 62: 761-768.

SUGIURA, S.H., DONG, F.M., RATHBONE, C.K., HARDY, R.W., 1998. Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. *Aquaculture*. 159: 177-202.

SURAI, P.F., SPARKS, N.H.C., 2001. Designer eggs: from improvement of egg composition to functional food. *Trends in Food Sci. Technol.* 12: 7-16.

SUWALSKY, M., RODRÍGUEZ, C., VILLENA, F., SOTOMAYOR, C.P., 2005. Human erythrocytes are affected by the organochloride insecticide chlordane. *Food Chem. Toxicol.* 43: 647-654.

TERANO, T., SHINA, T., YAMAMOTO, K., BAN, T., HIRAI, A., TAMURA, Y.S., KITAGAWA, M., 1997. Eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid inhibit DNA synthesis through inhibiting cdk2 kinase in vascular smooth muscle cells. *Ann. NY Acad. Sci.* 811: 369-377.

THOMASSEN, M.S., RØSJØ, C., 1989. Different fats in feed for salmon: influence on sensory parameters, growth rate and fatty acids in muscle and heart. *Aquaculture*. 79: 129-135.

TOCHER, D.R., BELL, J.G., MCGHEE, F., DICK, J.R., FONSECA-MADRIGAL, J., 2003. Effects of dietary lipid level and vegetable oil on fatty acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) over the whole production cycle. *Fish Physiol. and Biochem.* 29: 193-209.

TORSTENSEN, B.E., FRØYLAND, L., ØRNSRUD, R., LIE, Ø. 2004. Tailoring of a cardioprotective muscle fatty acid composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed vegetable oils. *Food Chemistry*. 87: 567-580.

TRAVIS, C., HATTEMER-FREY, H.A., 1991. Human exposure to dioxin. *Sci. Total Envir.* 104: 97-127.

TURCHINI, G.M., MENTASTI, T., FRØYLAND, L., ORBAN, E., CAPRINO, F., MORETTI, V.M., VALFRÉ, F., 2003. Effects of alternative dietary lipid sources on performance, tissue chemical composition, mitochondrial fatty acid oxidation capabilities and sensory characteristics in brown trout (*Salmo trutta* L.). *Aquaculture*. 225: 251-267.

VAN DEN BERG, M., BIRNBAUM, L., BOSVELD, A.T.C., BRUNSTRÖM, B., COOK, P., FEELEY, M., GIESY, J.P., HANBERG, A., HASEGAWA, R., KENNEDY, S.W., KUBIAK, T., LARSEN, J.C., ROLAF VAN LEEUWEN, F.X., DJIEN LIEM, A.K., NOLT, C., PETERSON, R.E., POELLINGER, L., SAFE, S., SCHRENK, D., TILLITT, D., TYSKLIND, M., YOUNES, M., WAERN, F., ZACHAREWSKI, T., 1998. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife. *Envir. Health Perspect.* 106: 775-792.

VAN GREENVENBROEK, M.M.J., ERKELENS, D.W., DE BRUIN, T.W.A., 1995. Do dietary fatty acids determine the amount of triglyceride and chylomicrons secreted by Caco-2 cells? O15 cell biology of lipoproteins and receptors. Oral session abstracts / Atherosclerosis, 115 (suppl.), S3-S42.

VIRKKUNEN, M.E., HORROBIN, D.F., JENKINS, D.K., MANKU, M.S., 1987. Plasma phospholipid essential fatty acids and prostaglandins in alcoholic, habitually violent, and impulsive offenders. *Biol. Psychiatry*. 22: 1087-1096.

WARD, O.P., SINGH, A., 2005. Omega-3/6 fatty acids: Alternative sources of production. *Process. Biochem.* 40: 3627-3652.

WINDELL, J.T., FOLTZ, J.W., SAROKON, J.A., 1978. Effect of fish size, temperature, and amount fed on nutrient digestibility of a pelleted diet by rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Trans. Am. Fish. Soc.* 107: 613-616.

YEHUDA, S., RABINOVITZ, S., CARASSO, R.L., MOSTOFSKY, D.I., 2002. The role of polyunsaturated fatty acids in restoring the aging neuronal membrane. *Neurobiol. Aging*. 23: 843-853.

YOSHIDA, S., YASUDA, A., KAWAZATO, H., SAKAI, K., SHIMADA, T., TAKESHITA, M., YUASA, S., KOBAYASHI, T., WATANABE, S., OKUYAMA, H., 1997. Synaptic vesicle ultrastructural changes in the rat hippocampus induced by a combination of α -linolenate deficiency and a learning task. *J. Neurochem.* 68: 1261-1268.

YOU DIM, K.A., MARTIN, A., JOSEPH, J.A., 2000. Essential fatty acids and the brain : possible health implications. *Int. J. Devl. Neurosci.* 18: 383-399.

Références en ligne

American Heart Association. [En ligne] www.americanheart.org. Visité le 17/05/05.

Canola Council of Canada. [En ligne] www.canola-council.org. Visité le 12/04/05.

Health Canada. [En ligne] <http://www.cfsan.fda.gov/~acrobat/haccpc09.pdf>. Visité le 02/02/07.

FAIR Agriculture and Fisheries [En ligne]
http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FAIR/ACTIONeqDndSESSIONeq2827200595ndDOCq7ndTBLeqEN_PROJ.htm. Visité le 02/02/07.

Food and Drug Administration (FDA) [En ligne]
http://www.fda.gov/ora/compliance_ref/cpg/cpgfod/cpg575-100.html. Visité le 02/02/2007.

Environnement Canada. [En ligne] www.msc.ec.gc.ca. Visité le 27/07/2005.

CHAPITRE 1
REVUE DE LITTÉRATURE

CHAPITRE 2
DIGESTIBILITY OF *SCHIZOCHYTRIUM* SP. IN RAINBOW TROUT
(*ONCORHYNCHUS MYKISS*) FEED: AN APPROACH TO FISH OIL
REPLACEMENT

RÉSUMÉ

Avec la diminution de la disponibilité de l'huile de poisson pour l'aquaculture, cette étude évalue la possibilité d'incorporer une algue marine, riche en acides gras polyinsaturés à longue chaîne (AGPLC), dans la moulée de truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). La digestibilité du *Schizochytrium* sp. a été évaluée à deux températures (8 et 15 °C). Aucune différence significative n'a été observée entre les températures pour les coefficients de digestibilité apparente (ADC) de la matière sèche (94.3 ± 4.9 %), des lipides totaux (85.8 ± 0.0 %), des protéines (89.5 ± 1.8 %), de l'énergie (83.1 ± 1.7 %) et des acides gras. De plus, l'ADC des nutriments, de l'énergie et des acides gras était élevée, ce qui démontre que le *Schizochytrium* sp. est un supplément en AGPLC de haute qualité qui pourrait compléter la moulée à base d'huile végétale, trop faible en acides gras bénéfiques pour maintenir leur niveaux dans les filets.

ABSTRACT

With continuously decreasing fish oil availability for use in aquaculture, this investigation was completed to determine whether an alternative marine source, rich in long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA), could be used effectively by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) when supplied to the diet. *Schizochytrium* sp. algal biomass was used in digestibility trials at two different temperatures, 8 and 15 °C. No significant difference was observed between temperatures for the apparent digestibility coefficients (ADC) of dry matter (94.3 ± 4.9 %), total lipid (85.8 ± 0.0 %), crude proteins (89.5 ± 1.8 %), energy (83.1 ± 1.7 %) and fatty acids. Moreover, ADC of nutrients, energy and fatty acids were of great importance, showing that *Schizochytrium* sp. is a high-quality candidate as a supplement of LC-PUFA in fish feed with vegetable oils where the percentage of these beneficial fatty acids is too low to maintain muscle fatty acid composition.

AVANT-PROPOS

Contribution de l'élève à la rédaction de l'article:

Ma contribution pour cet article a été l'élaboration du protocole de recherche, la gestion du projet et des manipulations de laboratoire. J'ai personnellement veillé au suivi du protocole, à l'avancement des analyses de laboratoire et j'ai dirigé les étudiants d'été. Je suis l'auteure principale, car j'ai effectué la recherche dans la littérature, les analyses statistiques et la rédaction de l'article.

Renseignement sur les co-auteurs :

Grant Vandenberg, Ph.D. (Université Laval)¹

Pierre Ayotte, Ph.D. (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Janice L. Bailey, Ph.D. (CRBR - Université Laval)¹

Dominique Bureau, Ph.D. (University of Guelph)³

Yvan Chouinard, Ph.D. (Université Laval)¹

Éric Dewailly, Ph.D. (Faculté de Médecine - Université Laval)⁴

Alain Leblanc, chimiste (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Jean-Philippe Weber, Ph.D. (Toxicologie humaine, INSPQ)²

¹Département des Sciences Animales, Pavillon Paul-Comtois, Université Laval, Québec, QC, G1K 7P4

²Toxicologie humaine, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

³Fish Nutrition Research Laboratory, Department of Animal and Poultry Science, University of Guelph, Guelph, ON, N1G 2W1

⁴Risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

Cet article sera soumis à l'hiver 2008.

CHAPITRE 3
VEGETABLE OILS AS SUSTAINABLE FISH OIL SUBSTITUTES IN
RAINBOW TROUT DIETS: AN APPROACH TO REDUCE
CONTAMINANT EXPOSURE AND FEED COSTS

RÉSUMÉ

L'huile de poisson totale (FO) a été remplacée et les ratios protéines digestibles/énergie digestible (DP/DE) ont été modifiés dans la moulée de truite arc-en-ciel afin de réduire l'accumulation de contaminants et les coûts de production. Les ratios 18 et 25 DP/DE ont été combinés à de l'huile de soya (SO), de canola (CO) et un mélange de canola et de *Schizochytrium* sp. (COS). Les huiles et les ratios DP/DE n'ont pas modifié la digestibilité apparente, la croissance, la flaveur et les paramètres somatiques. Cependant, les ratios $n-3/n-6$ ont diminué pendant la croissance. Une courte période de finition a restauré les niveaux $n-3/n-6$ pour les groupes CO et COS, indépendamment du ratio DP/DE, mais pas chez les groupes SO. Les polluants organiques persistants (POPs) ont diminué, peu importe le ratio DP/DE. Par rapport aux rations à base de FO, l'utilisation de SO et CO a diminué le coût des rations de 31% pour les traitements 18 DP/DE et de plus de 14% pour les traitements 25 DP/DE. En somme, les moulées 25 CO et COS, combinées à une finition, sont les moulées rencontrant au mieux nos objectifs.

ABSTRACT

The aim of this study was to replace 75% of total fish oil (FO) and alter digestible protein/digestible energy (DP/DE) in rainbow trout feeds to minimise contaminants exposure and feed costs. 18 and 25 DP/DE ratios were combined with soybean (SO), canola (CO) and a blend of canola oil and *Schizochytrium* sp. (COS). Dietary lipids and DP/DE ratios did not affect apparent digestibility, growth, somatic and sensory parameters. However, $n-3/n-6$ levels decreased significantly in the growth trial, especially for the SO groups. A short wash-out trial restored $n-3/n-6$ levels for the CO and COS groups, irrespective of the DP/DE ratio, but not for the SO groups. Persistent organic pollutants (POPs) were lowered, regardless of the DP/DE ratio. When compared to FO-based feeds, utilization of SO and CO reduced feed costs by 31% for the 18 DP/DE treatments and more than 14% for the 25 DP/DE treatments. In sum, the 25 CO and COS diets, with a wash-out period, were the most effective feeds for rainbow trout.

AVANT-PROPOS

Contribution de l'élève à la rédaction de l'article:

Ma contribution pour cet article a été l'élaboration du protocole de recherche, la gestion du projet et des manipulations de laboratoire. J'ai personnellement veillé au suivi du protocole, à l'avancement des analyses de laboratoire et j'ai dirigé les étudiants d'été. Je suis l'auteure principale, car j'ai effectué la recherche dans la littérature, les analyses statistiques et la rédaction de l'article.

Renseignement sur les co-auteurs :

Grant Vandenberg, Ph.D. (Université Laval)¹

Pierre Ayotte, Ph.D. (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Janice L. Bailey, Ph.D. (CRBR - Université Laval)¹

Dominique Bureau, Ph.D. (University of Guelph)³

Yvan Chouinard, Ph.D. (Université Laval)¹

Éric Dewailly, Ph.D. (Faculté de Médecine - Université Laval)⁴

Alain Leblanc, chimiste (Unité de recherche en santé publique, INSPQ)²

Jean-Philippe Weber, Ph.D. (Toxicologie humaine, INSPQ)²

¹Département des Sciences Animales, Pavillon Paul-Comtois, Université Laval, Québec, QC, G1K 7P4

²Toxicologie humaine, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

³Fish Nutrition Research Laboratory, Department of Animal and Poultry Science, University of Guelph, Guelph, ON, N1G 2W1

⁴Risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut National de Santé Publique du Québec (INSPQ), 945 Av. Wolfe, Québec, QC, G1V 5B3

Cet article sera soumis à l'hiver 2008.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'industrie de l'aquaculture doit répondre à plusieurs problèmes afin de contribuer au développement durable. D'abord, elle doit minimiser l'utilisation de sous-produits de poissons sauvages, tels que l'huile et la farine de poisson, car ces produits sont dispendieux et leur disponibilité est variable. De plus, l'industrie doit réduire l'exposition des ses produits d'élevage aux POPs afin de produire du poisson de qualité qui incitera le consommateur à s'en procurer. Pour répondre à ces objectifs, nous avons orienté notre étude sur le remplacement de 75 % de l'huile de poisson totale, dans la moulée de truite arc-en-ciel, par des huiles végétales. Nous avons donc utilisé de l'huile de soya, de canola et un mélange de canola et d'algues à forte teneur en ADH. Ces huiles ont été combinées à deux ratios DP/DE (18 et 25) afin d'évaluer l'impact de la modification des ratios DP/DE sur le développement des poissons.

Puisque les algues, *Schizochytrium* sp., n'avaient jamais été utilisées directement dans la moulée de truite arc-en-ciel, une étude de digestibilité a été complétée. Notre hypothèse a été confirmée, à savoir que le *Schizochytrium* sp. est un ingrédient hautement digestible, et peut donc compléter les moulées en huiles végétales, faibles en ADH.

L'étude sur les moulées à base d'huile végétale a été divisée en deux période, la période de croissance de 9 mois et la période de finition de 3 mois. Cette dernière a servi à rétablir les niveaux adéquats d'acides gras bénéfiques pour l'homme, grâce à l'utilisation d'une moulée seulement à base d'huile de poisson.

Les moulées végétales ont démontré une forte digestibilité chez la truite arc-en-ciel, tant pour les nutriments que pour les acides gras. La croissance et les paramètres de conditions n'ont pas été influencés par les moulées. L'appétence des poissons n'a pas été modifiée lorsque nourris avec les moulées expérimentales, ce qui indique que le consommateur serait enclin à acheter du poisson carnivore nourris avec des huiles végétales. De plus, la concentration des POPs a significativement diminuée grâce à l'utilisation des huiles

végétales dans la moulée. L'hypothèse initiale a donc été vérifiée pour la période de croissance.

RÉFÉRENCES

ABRIL, R., BARCLAY, W., 1998. Production of docosahexaenoic acid-enriched poultry eggs and meat using an algae-based feed ingredient. The return of ω 3 fatty acids into the food supply. 1. Land-based animal food products and their health effects. Simopoulos, A.P. World Rev. Nutr. Diet., Basel, Karger, 83, 77-88.

ABRIL, R., GARRETT, J., ZELLER, S.G., SANDER, W.J., MAST, R.W., 2003. Safety assessment of DHA-rich microalgae from *Schizochytrium* sp.- Part V : target animal safety/toxicity study in growing swine. Regul. Toxicol. Pharmacol. 37: 73-82.

ALCOCK, R.E., BEHNISCH, P.A., JONES, K.C., HAGENMAIER, H., 1998. Dioxin-like PCBs in the environment - Human exposure and the significance of sources. Chemosphere. 37: 1457-1472.

AOAC, 1990, AOAC official methods of analysis, 15th ed. Association of Official analytical chemists, Washington, DC. Method number 927.05, 930.30.

AOAC, 2000. AOAC official method 996.06. Fat (Total, saturated, and unsaturated) in foods. Hydrolytic extraction gas chromatographic method. AOAC official methods of analysis. Chapter 41, p.20-25.

ARZEL, J., MARTINEZ LOPEZ, F.X., MÉTAILLER, R., STÉPHAN, G., VIAU, M., GANDEMER, G., GUILLAUME, J., 1994. Effect of dietary lipid on growth performance and body composition of brown trout (*Salmo trutta*) reared in seawater. Aquaculture. 123: 361-375.

AWAD, A.B., BEGDACHE, L.A., FINK, C.S., 2000. Effect of sterols and fatty acids on growth and triglyceride accumulation in 3T3-L1 cells. J. Nutr. Biochem. 11: 153-158.

AZEVEDO, P.A., LEESON, S., CHO, C.Y., BUREAU, D.P., 2004. Growth, nitrogen and energy utilization of juveniles from four salmonid species: diet, species and size effects. Aquaculture. 234: 393-414.

AZEVEDO, P.A., VAN MILGEN, J., LEESON, S., BUREAU, D.P., 2005. Comparing efficiency of metabolizable energy utilization by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) using factorial and multivariate approaches. J. Anim. Sci. 83: 842-851.

BAKHSHISH, S.D., HIGGS, D.A., PLOTNIKOFF, M.D., MARKERT, J.R., BUCKLEY, J.T., 1988. Preliminary evaluation of canola oil, pork lard and marine lipid singly and in combination as supplemental dietary lipid sources for juvenile fall Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). Aquaculture. 68: 325-343.

BARCLAY, W., ZELLER, S., 1996. Nutritional enhancement of n-3 and n-6 fatty acids in rotifers and *Artemia nauplii* by feeding spray-dried *Schizochytrium* sp. *JWAS*. 27: 314-322.

BARCLAY, W., ABRIL, R., ABRIL, P., WEAVER, C., ASHFORD, A., 1998. Production of docosahexaenoic acid from microalgae and its benefits for use in animal feeds. The return of ω 3 fatty acids into the food supply. 1. Land-based animal food products and their health effects. Simopoulos, A.P. *World Rev. Nutr. Diet.*, Basel, Karger, 83, 61-76.

BARCLAY, W.R., 1992. Process for the heterotrophic production of microbial products with high concentrations of omega-3 highly unsaturated fatty acids. U.S. Patent 5,130,242. United States Patent and Trademark Office, Washington, DC.

BELL, J.G., DICK, J.R., SARGENT, J.R., 1993. Effect of diets rich in linoleic or α -linolenic acid on phospholipid fatty acid composition and eicosanoid production in atlantic salmon (*Salmo salar*). *Lipids*. 28: 819-826.

BELL, J.G., MCGHEE, F., CAMPBELL, P.J., SARGENT, J.R., 2003. Rapeseed oil as an alternative to marine fish oil in diets of post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*): changes in flesh fatty acid composition and effectiveness of subsequent fish oil "wash out". *Aquaculture*. 218: 515-528.

BELL, J.G., MCGHEE, F., DICK, J.R., TOCHER, D.R., 2005. Dioxin and dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCBs) in Scottish farmed salmon (*Salmo salar*): effects of replacement of dietary marine fish oil with vegetable oils. *Aquaculture*. 243: 305-314.

BELL, J.G., DICK, J.R., MCVICAR, A.H., SARGENT, J.R., THOMPSON, K.D., 1993. Dietary sunflower, linseed and fish oils affect phospholipid fatty acid composition, development of cardiac lesions, phospholipase activity and eicosanoid production in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 49: 665-673.

BELL, J.G., ASHTON, I., SECOMBES, C.J., WEITZEL, B.R., DICK, J.R., 1996. Dietary lipid affects phospholipid fatty acid compositions, eicosanoid production and immune function in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 54: 173-182.

BELL, J.G., MCEVOY, J., TOCHER, D.R., MCGHEE, F., CAMPBELL, P.J., SARGENT, J.R., 2001. Replacement of fish oil with rapeseed oil in diets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects tissue lipid compositions and hepatocyte fatty acid metabolism. *Nutr. Metab.* 131: 1535-1543.

BELL, J.G., HENDERSON, R.J., TOCHER, D.R., MCGHEE, F., DICK, J.R., PORTER, A., SMULLEN, R.P., SARGENT, J.R., 2002. Substituting fish oil with crude palm oil in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects muscle fatty acid composition and hepatic fatty acid metabolism. *J. Nutr.* 132: 222-230.

BELLUZZI, A., BRIGNOLA, C., CAMPIERI, M., PERA, A., BOSCHI, S., MIGLIOLI, M., 1996. Effect of an enteric-coated fish-oil preparation on relapses in Crohn's disease. *N. Engl. J. Med.* 334: 1557-1560.

BERG, O.K., BREMSET, G., 1998. Seasonal changes in the body composition of young riverine Atlantic salmon and brown trout. *J. Fish Biol.* 52: 1272-1288.

BERNTSSEN, M.H.G., LUNDEBYE, A.-K., TORSTENSEN, B.E., 2005. Reducing the levels of dioxins and dioxin-like PCBs in farmed Atlantic salmon by substitution of fish oil with vegetable oil in the feed. *Aquac. Nutr.* 11: 219-231.

BERTAZZI, P.A., CONSONNI, D., BACHETTI, S., RUBAGOTTI, M., BACCARELLI, A., ZOCCHETTI, C., PESATORI, A.C., 2001. Health effects of dioxin exposure: A 20-year mortality study. *Am. J. Epidemiol.* 153: 1031-1044.

BIMBO, A.P., 1990. Production of fish oil. *Fish oils in nutrition*. Stansby, M.E. (ed), Van Nostrand Reinhold, New York, 141-180.

BLANCHET, C., LUCAS, M., DEWAILLY, É. 2005. Analyses des acides gras oméga-3 et des contaminants environnementaux dans les salmonidés. Unité de recherche en santé publique, Centre de Recherche du Pavillon du CHUL, Québec, Qc, 1-47.

BOEHM, G., BORTE, M., BÖHLES, H.J., MÜLLER, H., KOHN, G., MORO, G., 1996. Docosahexaenoic and arachidonic acid content of serum and red blood cell membrane phospholipids of preterm infants fed breast milk, standard formula or formula supplemented with n-3 and n-6 long-chain polyunsaturated fatty acids. *Eur. J. Pediatr.* 155: 410-416.

BOEING, P., 1997. Use of pray-dried *Schizochytrium* sp. as a partial algal replacement for juvenile bivalves. *J. Shellfish Res.* 16: 284.

BOGGIO, S.M., HARDY, R.W., BABBIT, J.K., BRANNON, E.L., 1985. The influence of dietary lipid source and alpha-tocopheryl acetate level on product quality rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aquaculture.* 51: 13-24.

BONEFELD-JØRGENSEN, E.C., 2004. The Human Health Effect Programme in Greenland, a review. *Sci. Total Environ.* 331: 215-231.

BRANCHI, I., CAPONE, F., ALLEVA, E., COSTA, L.G., 2003. Polybrominated diphenyl ethers: neurobehavioral effects following developmental exposure. *Neurotoxicology.* 24: 449-462.

BRANSDEN, M.P., CARTER, G.C., NICHOLS, P.D., 2003. Replacement of fish oil with sunflower oil in feeds for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): effect on growth performance, tissue fatty acid composition and disease resistance. *Comp. Bioch. Physiol. Part B.* 135: 611-625.

BUREAU, D.P., HUA, K., HARRIS, A.M., 2007. The effect of dietary lipid and long-chain n-3 PUFA levels on growth, energy utilization, carcass quality and immune function of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *JWAS. Article soumis.*

- BUREAU, D.P., HARRIS, A.M., CHO, C.Y., 1999. Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 180: 345-358.
- BURR, M.L., FEHILY, A.M., GILBERT, J.F., ROGERS, S., HOLLIDAY, R.M., SWEETNAM, P.M., ELWOOD, P.C., DEADMAN, N.M., 1989. Effects of changes in fat, fish, and fibre intake on death and myocardial reinfarction: diet and reinfarction trial (DART). *Lancet*. 2: 757-761.
- BUZZI, M., HENDERSON, R.J., SARGENT, J.R., 1996. The desaturation and elongation of linolenic acid and eicosapentaenoic acid by hepatocytes and liver microsomes from Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets containing fish oil or olive oil. *Biochim. Biophys. Acta*. 1299: 235-244.
- CABALLERO, M.J., OBACH, A., ROSENLUND, G., MONTERO, D., GISVOLD, M., IZQUIERO, M.S., 2002. Impact of different dietary lipid sources on growth, lipid digestibility, tissue fatty acid composition and histology of Rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture*. 214: 253-271.
- CASSIDY, M., MATU, A., DOWNING, G., 2002. Baseline risk study of potential chemical contaminants in Ontario farm-raised rainbow trout. [En ligne] <http://www.aps.uoguelph.ca/~aquacentre/aec/publications/contaminants.pdf>. 01-03-2007
- CHAPMAN, M.J., 1980. Animal lipoproteins : chemistry, structure, and comparative aspects. *J. Lipid Res*. 21: 789-853.
- CHARNOV, E.L., TURNER, T.F., WINEMILLER, K.O., 2001. Reproductive constraints and the evolution of life histories with indeterminate growth. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 98: 9460-9464.
- CHO, C.Y., SLINGER, S.J., 1979. Apparent digestibility measurement in feedstuffs for rainbow trout. *Proc. World Symp. on Finfish Nutrition and Fishfeed Technology*. Berlin, 2, 239-247.
- CHO, C.Y., KAUSHIK, S.J., 1990. Nutritional energetics in fish: energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Aspects of food production, consumption and energy values*. World Rev. Nutr. Diet. Bourne GH (ed), Basel, Karger, 61, 132-172.
- CHO, C.Y., BAYLEY, H.S., S.J., SLINGER, 1974. Partial replacement of herring meal with soybean meal and other changes in a diet for rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Fish. Res. Board Can.* 31: 1523-1528.
- CHO, C.Y., SLINGER, S.J., BAYLEY, H.S., 1982. Bioenergetics of salmonid fishes : Energy intake, expenditure and productivity. *Comp. Biochem. Physiol.* 73B: 25-41.

CLARKE, S.D., JUMP, D.B., 1994. Dietary polyunsaturated fatty acid regulation of gene transcription. *Annu. Rev. Nutr.* 14: 83-98.

CONNOR, W.E., NEURINGER, M., REISBICK, S., 1991. Essentiality of ω 3 fatty acids : Evidence from the primate model and implications for human nutrition. Health effects of ω 3 polyunsaturated fatty acids in seafoods. Simopoulos, A.P., Kifer, R.R., Martin, R.E. , Barlow, S.M. *World Rev. Nutr. Diet*, Basel, Karger, 66, 118-132.

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DES RESSOURCES ET DE L'ENVIRONNEMENT, 1986. La question des BPC. [En ligne] www.ec.gc.ca. 1-36.

COOKE, P.S., ZHAO, Y.-D., HANSEN, L.G., 1996. Neonatal polychlorinated biphenyl treatment increases adult testis size and sperm production in the rat. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 136: 112-117.

CORSOLINI, S., ADEMOLLO, N., ROMEO, T., GRECO, S., FOCARDI, S., 2005. Persistent organic pollutants in edible fish : a human and environmental health problem. *Microchem. J.* 79: 115-123.

CRAWFORD, M.A., 1968. Fatty-acid ratios in free-living and domestic animals : Possible implications for atheroma. *Lancet.* 291: 1329-1333.

DAHLEN, S.-E., BJORK, J., HEDQVIST, P., ARFORS, K.-E., HAMMARSTROM, S., LINDGREN, J.-A., SAMUELSSON, B., 1981. Leukotrienes promote plasma leakage and leukocyte adhesion in post capillary venules: In vivo effects with relevance to the acute inflammatory response. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 78: 3887-3891.

DAS, U.N., VIJAYKUMAR, K., MADHAVI, N., SURYAPRABHA, P., SRAVANKUMAR, G., RAMESH, G., KORATKAR, R., SANGEETHA SAGAR, P., PADMA, M., 1992. Psoriasis : Current concepts and new approaches to therapy. *Med. Hyp.* 38: 56-62.

DAY, T., TAYLOR, P.D., 1997. Von Bertalanffy's growth equation should not be used to model age and size at maturity. *Am. Nat.* 149: 381-393.

DE CATERINA, R., CYBULSKY, M.I., CLINTON, S.K., GIMBRONE JR, M.A., LIBBY, P., 1994. The omega-3 fatty acid docosahexaenoate reduces cytokine-induced expression of proatherogenic and proinflammatory proteins in human endothelial cells. *Arterioscler. Thromb.* 14: 1829-1836.

DE CATERINA, R., CAPRIOLI, R., GIANNESI, D., SICARI, R., GALLI, C., LAZZERINI, G., BERNINI, W., CARR, L., RINDI, P., 1993. n-3 fatty acids reduce proteinuria in patients with chronic glomerular disease. *Kidney Int.* 44: 843-850.

DEPLANO, M., DIAZ, J.P., CONNES, R., KENTOURIDIVANACH, M., CAVALIER, F., 1991. Appearance of lipid-absorption capacities in larvae of the sea bass *Dicentrarchus labrax* during transition to the exotrophic phase. Mar. Biol. 108: 361-371.

DUMAS, A., FRANCE, J., BUREAU, D.P., 2007. Evidence of three growth stanzas in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) across life stages and adaptation of the thermal-unit growth coefficient. Aquaculture. doi: 10.1016/j.aquaculture.2007.1001.1041.

DYERBERG, J., LEAF, A., GALLI, C., SIMOPOULOS, A.P., ACKMAN, R.G., CRAWFORD, M., DE CATERINA, R., HORNSTRA, G., INNIS, S., KARYADI, D., KOLETZKO, B., LAGARDE, M., LEIGHTON, F., MARTIN, R., MARTINÉZ, M., NESTEL, P., NORDØY, A., RENAUD, S., SPECTOR, A., TAMURA, Y., UAUY, R., 1995. ISSFAL board statement: Recommendations for the essential fatty acid requirement for infant formulas. J. Am. Coll. Nutr. 14: 213-214.

EINEN, O., ROEM, A.J., 1997. Dietary protein/energy ratios for Atlantic salmon in relation to fish size: growth, feed utilization and slaughter quality. Aquac. Nutr. 3: 115-126.

FAO, 2000. The state of world fisheries and aquaculture. Rome: 160 pp.

FAO, 2004. Global aquaculture production 1950-2004 - Fisheries statistics (FIGIS). [En ligne] www.fao.org/figis/servlet/TabSelector. 2007-03-15

FAO, 2007. The state of world fisheries and aquaculture 2006. Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. [En ligne] <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0699e/a0699e.pdf>. Rome, 180 pp.

FAQI, A.S., DALSENTER, P.R., MERKER, H.-J., CHAHOUD, I., 1998. Reproductive toxicity and tissue concentrations of low doses of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin in male offspring rats exposed throughout pregnancy and lactation. Toxicol. Appl. Pharmacol. 150: 383-392.

FISCHER, D., HOOPER, K., ATHANASIADOU, M., ATHANASSIADIS, I., BERGMAN, A., 2006. Children show highest levels of polybrominated diphenyl ethers in a California family of four: A case study. Envir. Health Perspect. 114: 1581-1584.

FROYLAND, L., LIE, O., BERGE, R.K., 2000. Mitochondrial and peroxisomal beta-oxidation capacities in various tissues from Atlantic salmon *Salmo salar*. Aquac. Nutr. 6: 85-89.

GRABER, R., SUMIDA, C., NUNEZ, E.A., 1994. Fatty acids and cell signal transduction. J. Lipid Mediators Cell Signalling. 9: 91-116.

GREENE, D.H.S., SELIVONCHICK, D.P., 1987. Lipid metabolism in fish. Prog. Lipid Res. 26: 53-85.

GREENE, D.H.S., SELIVONCHICK, D.P., 1990. Effects of dietary vegetable, animal and marine lipids on muscle lipid and hematology of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 89: 165-182.

GRISDALE-HELLAND, B., HELLAND, S.J., 1997. Replacement of protein by fat and carbohydrate in diets for atlantic salmon (*Salmo salar*) at the end of the freshwater stage. *Aquaculture*. 152: 167-180.

GRISDALE-HELLAND, B., RUYTER, B., ROSENLUND, G., OBACH, A., HELLAND, S.J., SANDBERG, M.G., STANDAL, H., RØSJØ, C., 2002. Influence of high contents of dietary soybean oil on growth, feed utilization, tissue fatty acid composition, heart histology and standard oxygen consumption of Atlantic salmon (*Salmo salar*) raised at two temperatures. *Aquaculture*. 207: 311-329.

GUILLETTE, L.J., PICKFORD, D.B., CRAIN, D.A., ROONEY, A.A., PERCIVAL, H.F., 1996. Reduction in penis size and plasma testosterone concentrations in juvenile alligators living in a contaminated environment. *Gen. Comp. Endocrin.* 101: 32-42.

GUILLETTE, L.J., GROSS, T.S., MASSON, G.R., MATTER, J.M., PERCIVAL, H.F., WOODWARD, A.R., 1994. Developmental abnormalities of the gonad and abnormal sex hormone concentrations in juvenile alligators from contaminated and control lakes in Florida. *Envir. Health Perspec.* 102: 680-689.

GUILLOU, A., SOUCY, P., KHALIL, M., ADAMBOUNOU, L., 1995. Effects of dietary vegetable and marine lipid on growth, muscle fatty acid composition and organoleptic quality of flesh of Brook charr (*Salvelinus fontinalis*). *Aquaculture*. 136: 351-362.

GULATI, S.K., MAY, C., WYNN, P.C., SCOTT, T.W., 2002. Milk fat enriched in *n*-3 fatty acids. *Animal Feed Sci. Technol.* 98: 143-152.

HAMMOND, B.G., MAYHEW, D.A., KIER, L.D., MAST, R.W., SANDER, W.J., 2002. Safety assessment of DHA-rich microalgae from *Schizochytrium* sp. IV. Mutagenicity studies. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 35: 255-265.

HARDY, R.W., SCOTT, T.M., HARRELL, L.W., 1987. Replacement of herring oil with menhaden oil, soybean oil, or tallow in the diet of Atlantic salmon raised in marine net-pens. *Aquaculture*. 65: 267-277.

HARRISON, N., WEARNE, S., DE M. GEM, M.G., GLEADLE, A., STARTIN, J., THORPE, S., WRIGHT, C., KELLY, M., ROBINSON, C., WHITE, S., HARDY, D., EDINBURGH, V., 1998. Time trends in human dietary exposure to PCDDs, PCDFs and PCBs in the UK. *Chemosphere*. 37: 1657-1670.

HELLAND, S.J., GRISDALE-HELLAND, B., 1998. The influence of replacing fish meal in the diet with fish oil on growth, feed utilization and body composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) during the smoltification period. *Aquaculture*. 162: 1-10.

HENDERSON, R.J., 1996. Fatty acid metabolism in freshwater fish with particular reference to polyunsaturated fatty acids. *Arch. Anim. Nutr.* 49: 5-22.

HIBBELN, J.R., 1998. Fish consumption and major depression. *Lancet.* 351: 1213.

HILLESTAD, M., JOHNSEN, F., 1994. High-energy/low-protein diets for Atlantic salmon: effects on growth, nutrient retention and slaughter quality. *Aquaculture.* 124: 109-116.

HIRAI, A., TERANO, T., MAKUTA, H., OZAWA, A., FUJITA, T., TAMUARA, Y., YOSHIDA, S., 1989. Effect of oral administration of highly purified eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid on platelet function and serum lipids in hyperlipidemic patients. *Adv. Prostagl., Thromb. Leuk.* 19: 627-630.

HITES, R.A., FORAN, J.A., CARPENTER, D.O., HAMILTON, M.C., KNUTH, B.A., SCHWAGER, S.J., 2004. Global assessment of organic contaminants in farmed salmon. *Science.* 303: 226-229.

HORROCKS, L.A., YEO, Y.K., 1999. Health benefits of docosahexaenoic acid (DHA). *Pharmacol. Research.* 40: 211-225.

HSU, P.-C., LI, M.-H., GUO, Y.L., 2003. Postnatal exposure of 2,2',3,3',4,6'-hexachlorobiphenyl and 2,2',3,4',5',6-hexachlorobiphenyl on sperm function and hormone levels in adult rats. *Toxicology.* 187: 117-126.

INDU, M., GHAFOORUNISSA, 1992. n-3 fatty acids in Indian diets - Comparison of the effects of precursor (alpha-linolenic acid) vs product (long chain n-3 polyunsaturated fatty acids). *Nutr. Research.* 12: 569-582.

IZQUIERDO, M.S., SOCORRO, J., ARANTZAMENDI, L., HERNANDEZ-CRUZ, C.M., 2000. Recent advances in lipid nutrition in fish larvae. *Fish Physiol. Biochem.* 22: 97-107.

IZQUIERDO, M.S., MONTERO, D., ROBAINA, L., CABALLERO, M.J., ROSENLUND, G., GINÉS, R., 2005. Alterations in fillet fatty acid profile and flesh quality in gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed vegetable oils for a long term period. Recovery of fatty acid profiles by fish oil feeding. *Aquaculture.* 250: 431-444.

JACOBSON, J.L., JACOBSON, S.W., 1997. Evidence for PCBs as neurodevelopmental toxicants in humans. *Neurotoxicology.* 18: 415-424.

JOHNSEN, R.I., GRAHL-NIELSEN, O., ROEM, A., 2000. Relative absorption of fatty acids by Atlantic salmon *Salmo salar* from different diets, as evaluated by multivariate statistics. *Aquac. Nutr.* 6: 255-261.

KARP, G.C., 2004. *Biologie cellulaire et moléculaire.* Éditions De Boeck Université, Bruxelles, Belgique, p.141.

KREMEN, A.J., LINNER, J.H., NELSON, C.H., 1954. An experimental evaluation of the nutritional importance of proximal and distal small intestine. *Ann. Surg.* 140: 439-448.

KIM, I.S., 2001. Effects of exposure of lactating female rats to polychlorinated biphenyls (PCBs) on testis weight, sperm production and sertoli cell numbers in the adult male offspring. *J. Vet. Med. Sci.* 63: 5-9.

KOGEVINAS, M., 2001. Human health effects of dioxins: cancer, reproductive and endocrine system effects. *Human Reprod. Update.* 7: 331-339.

KOSHIO, S., ACKMAN, R.G., LALL, S.P., 1994. Effects of oxidized herring and canola oils in diets on growth, survival, and flavor of Atlantic salmon, *Salmo salar*. *J. Agric. Food Chem.* 42: 1164-1169.

KROGDAHL, A., SUNDBY, A., OLLI, J.J., 2004. Atlantic salmon (*Salmo salar*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) digest and metabolize nutrients differently. Effects of water salinity and dietary starch level. *Aquaculture.* 229: 335-360.

LAMBERT, M.R., JACOBSON, N.L., ALLEN, R.S., ZALETEL, J.H., 1954. Lipid deficiency in the calf. *J. Nutrition.* 52: 259-272.

LANARI, D., D'AGARO, E., BALLESTRAZZI, R., 1995. Effect of dietary DP/DE ratio on apparent digestibility, growth and nitrogen and phosphorus retention in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquac. Nutr.* 1: 105-110.

LANGDON, C., ÖNAL, E., 1999. Replacement of living microalgae with spray-dried diets for the marine mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Aquaculture.* 180: 283-294.

LIN, P., CHANG, Y.-C., CHEN, C.-H., YANG, W.-J., CHENG, Y.-H., CHANG, L.W., 2004. A comparative study on the effects of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin polychlorinated biphenyl 126 and estrogenin human bronchial epithelial cells. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 195: 83-91.

LEASE, E.J., LEASE, J.G., WEBER, J. STEENBOCK, H., 1938. Destruction of vitamin A by rancid fats. *J. Nutrition.* 16: 571-583.

LOPEZ-ESPINOSA, M.-J., GRANADA, A., CARRENO, J., SALVATIERRA, M., OLEA-SERRANO, F., OLEA, N., 2006. Organochlorine pesticides in placentas from Southern Spain and some related factors. *Placenta.* doi:10.1016/j.placenta.2006.1009.1009.

LORENZ, S.G., VAN ELSWYK, M.E., 1997. Chicken breast meat as a food-based supplement for dietary n-3 fatty acid. *J. Am. Diet Assoc.* 97: A97.

LONGENECKER, H.E., MATTIL, K.F., 1942. Glyceride structure of rat body fats. - Presented 29th annual meeting of federation of american societies for experimental biology, Boston.

LYMAN, J.F., 1917. Metabolism of fats. 1. Utilization of palmitic acid, glyceryl palmitate and ethyl palmitate by the dog. *J. Biology. Chem.* 32: 7-11.

LYNCH, M.J., STANLEY, S., RAPHAEL, L.D., MELLOR, P.D., SPARE, P., HILLS, P., INWOOD, J.M., 1963. *Medical Laboratory Technology*. W.B. Saunders company, Philadelphia and London.

MACHLIN, L.J., GORDON, R.S., MEISKY, K.A, MADDLY, K.H., 1959 Relationship of oxidase degradation to toxicity in certain fats. *Poultry Sci.* 38: 579-585.

MAGUIRE, R.J., SIBLEY, P.K., SOLOMON, K.R., DELORME, P., 2003. 3. Pesticides. [En ligne] <http://www.nwri.ca/threatsfull/ch3-1-f.html>.

MCLENNAN, P., HOWE, P., ABEYWARDENA, M., MUGGLI, R., RAEDERSTORFF, D., MANO, M., RAYNER, T., HEAD, R., 1996. The cardiovascular protective role of docosahexaenoic acid. *Eur. J. Pharmacol.* 300: 83-89.

MEEKER, J.D., ALTSHUL, L., HAUSER, R., 2007. Serum PCBs, *p,p'*-DDE and HCB predict thyroid hormone levels in men. *Envir. Resarch.* doi:10.1016/j.envres.2006.1011.1007.

MEIRONYTÉ GUVENIUS, D., NORÉN, K., BERGMAN, A., 1999. Organohalogen contaminants in human with emphasis on polybrominated diphenyl ethers. *J. Toxicol. Environ. Health Part A.* 58: 329-341.

MEIRONYTÉ GUVENIUS, D., BERGMAN, A., NORÉN, K., 2001. Polybrominated diphenyl ethers in Swedish human liver and adipose tissue. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 40: 564-570.

MENOYO, D., LOPEZ-BOTE, C.J., BAUTISA, J.M., 2005. Effect of dietary fish oil substitution with linseed oil on the performance, tissue fatty acid profile, metabolism, and oxidative stability of Atlantic salmon. *J. Anim. Sci.* 83: 2853-2862.

MENOYO, D., LOPEZ-BOTE, CLEMENTE J., BAUTISA, JOSÉ M., OBACH, ALEX, 2003. Growth, digestibility and fatty acid utilization in large Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed varying levels of n-3 saturated fatty acids. *Aquaculture.* 225: 295-307.

MYERS, G.J., DAVIDSON, P.W., COX, C., SHAMLAYE, C., CERNICHIARI, E., CLARKSON, T.W., 1999. Twenty-seven years studying the human neurotoxicity of methylmercury exposure. *Envir. Research Sect. A.* 83: 275-285.

NAGAYAMA, J., TSUJI, H., IIDA, T., HIRAKAWA, H., MATSUEDA, T., OKAMURA, K., HASEGAWA, M., SATO, K., MA, H.-Y., YANAGAWA, T., IGARASHI, H., FUKUSHIGE, J., WATANABE, T., 1998. Postnatal exposure to chlorinated dioxins and related chemicals on lymphocyte subsets in Japanese breast-fed infants. *Chemosphere.* 37: 1781-1787.

NAKAMURA, M.T., NARA, T.Y., 2003. Essential fatty acid synthesis and its regulation in mammals. *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 68: 145-150.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 1993. Nutrient requirements of fish. National Academy Press, Washington DC.

NESTLER, J.E., CLORE, J.N., BLACKARD, W.G., 1991. Metabolism and actions of dehydroepiandrosterone in humans. *J. Steroid Biochem. Molec. Biol.* 40: 599-605.

NETTLETON, J.A., KATZ, R., 2005. n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids in type 2 diabetes : A review. *J. Am. Diet Assoc.* 105: 428-440.

NG, W.-K., SIGHOLT, T., BELL, J.G., 2004. The influence of environmental temperature on the apparent nutrient and fatty acid digestibility in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed finishing diets containing different blends of fish oil, rapeseed oil and palm oil. *Aquaculture Res.* 35: 1228-1237.

NG, W.-K., CAMPBELL, P.J., DICK, J.R., BELL, J.G., 2003. Interactive effects of dietary palm oil concentration and water temperature on lipid digestibility in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Lipids*. 38: 1031-1038.

NORÉN, K., MEIRONYTÉ, D., 2000. Certain organochlorine and organobromine contaminants in Swedish human milk in perspective of past 20-30 years. *Chemosphere*. 40: 111-1123.

NUERNBERG, K., FISCHER, K., NUERNBERG, G., KUECHENMEISTER, U., KLOSOWSKA, D., ELIMINOWSKA-WENDA, G., FIEDLER, I., ENDER, K., 2005. Effects of dietary olive and linseed oil on lipid composition, meat quality, sensory characteristics and muscle structure in pigs. *Meat Sci.* 70: 63-74.

OLSEN, R.E., MYKLEBUST, R., RINGØ, E., MAYHEW, T.M., 2000. The influence of dietary linseed oil and saturated fatty acids on caecal enterocytes in Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) : a quantitative ultrastructural study. *Fish Physiol. and Biochem.* 22: 207-216.

OLSEN, R.E., HENDERSON, R.J., SOUNTAMA, J., HEMRE, G.-I., RINGØ, MELLE, W., TOCHER, D.R., 2004. Atlantic salmon, *Salmo salar*, utilizes wax ester-rich oil from *Calanus finmarchicus* effectively. *Aquaculture*. 240: 433-449.

PEAKALL, D.B., LINCER, J.L., RISEBROUGH, R.W., PRITCHARD, J.B., KINTER, W.B., 1973. DDE-induced egg-shell thinning: structural and physiological effects in three species. *Comp. Gen. Pharmac.* 4: 305-313.

PEAT, J.K., SALOME, C.M., WOOLCOCK, A.J., 1992. Factors associated with bronchial hyperresponsiveness in Australian adults and children. *Eur. Resp. J.* 5: 921-929.

- PIEDECAUSA, M.A., MAZÓN, M.J., GARCÍA GARCÍA, B., HERNÁNDEZ, M.D., 2006. Effects of total replacement of fish oil by vegetable oils in the diets of sharpsnout seabream (*Diplodus puntazzo*). *Aquaculture*. 263: 211-219.
- RAES, K., DE SMET, S., DEMEYER, D., 2004. Effect of dietary fatty acids on incorporation of long chain polyunsaturated fatty acids and conjugated linoleic acid in lamb, beef and pork meat : a review. *Animal Feed Sci. Technol.* 113: 199-221.
- RASMUSSEN, R.S., OSTENFELD, T.H., 2000. Effect of growth rate on quality traits and feed utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Aquaculture*. 184: 327-337.
- RATLEDGE, C., 2004. Fatty acid biosynthesis in microorganisms being used for single cell oil production. *Biochimie*. 86: 807-815.
- REFTIE, S., KORSØEN, Ø.J.K., STOREBAKKEN, T., BAEVERFJORD, G., LEIN, I., ROEM, A.J., 2000. Differing nutritional responses to dietary soybean meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*. 190: 49-63.
- REGOST, C., ARZEL, J., ROBIN, J., ROSENLUND, G., KAUSHIK, S.J., 2003. Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in Turbot (*Psetta maxima*) 1. Growth performance, flesh fatty acid profile, and lipid metabolism. *Aquaculture*. 217: 465-482.
- RICHARDSON, A.J., 2004. Clinical trials of fatty acid treatment in ADHD, dyslexia, dyspraxia and the autistic spectrum. *Prost. Leuk. Ess. Fatty Acids*. 70: 383-390.
- RITTER, J.M., TAYLOR, G.W., 1988. Fish oil in asthma. *Thorax*. 43: 81-83.
- ROBERTSON, J.A., 1972. Sunflowers: America's neglected crop. *J. Am. Oil Chemist' Soc.* 49: 239-244.
- ROBIN, J.H., REGOST, C., ARZEL, J., KAUSHIK, S.J., 2003. Fatty acid profile of fish following a change in dietary fatty acid source: model of fatty acid composition with a dilution hypothesis. *Aquaculture*. 225: 283-293.
- RONSHOLDT, B., 1995. Effect size/age and feed composition on body composition and phosphorus content of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Water Sci. Technol.* 31: 175-183.
- ROSENLUND, G., OBACH, A., SANDBERG, M.G., STANDAL, H., TVEIT, K., 2001. Effect of alternative lipid sources on long-term growth performance and quality of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture Res.* 32: 323-328.
- ROULET, M., FRASCAROLO, P., RAPPAZ, I., PILET, M., 1997. Essential fatty acid deficiency in well nourished young cystic fibrosis patients. *Eur. J. Pediatr.* 156: 952-956.

ROZMAN, K.K., LEBOSKY, M., PINSON, D.M., 2005. Chronic toxicity and carcinogenicity of 1,2,3,4,6,7,8-heptachlorodibenzo-*p*-dioxin displays a distinct dose/time toxicity threshold ($c \times t = k$) and a life-prolonging subthreshold effect. *Food Chem. Toxicol.* 43: 729-740.

RUOHONEN, K., VIELMA, J., GROVE, D.J., 1998. Growth and food utilisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low-fat herring and dry diets enriched with fish oil. *Aquaculture.* 168: 275-283.

SANTÉ CANADA ET ACIA, 2002. Études sur les poissons et les fruits de mer. [En ligne] http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/surveill/other-autre/fish-poisson/index_f.html. 2004-09-13.

SARGENT, J., BELL, G., MCEVOY, L., TOCHER, D., ESTEVEZ, A., 1999. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish. *Aquaculture.* 177: 191-199.

SARGENT, J.R., TOCHER, D.R., BELL, J.G., 2002. Fish nutrition. The lipids. Halver, J.E., Hard, R.W., (ed.). Academic Press, London,

SCHECTER, A., PAVUK, M., PÄPKE, O., RYAN, J.J., BIRNBAUM, L., ROSEN, R., 2003. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in U.S. mother's milk. *Envir. Health Perspect.* 111: 1723-1729.

SHEPPARD, A.J., IVERSON, J.L., WEIHRAUCH, J.L., 1978. Fatty acids and glycerides. *Handbook of Lipid Research.* 1. Anis Kuksis ed., Plenum Press, New York, 341-379.

SIGURGISLADOTTIR, S., LALL, S.P., PARRISH, C.C., ACKMAN, R.G., 1992. Cholestane as a digestibility marker in the absorption of polyunsaturated fatty acid ethyl esters in Atlantic salmon. *Lipids.* 27: 418-424.

SIMOPOULOS, A.P., 1995. Evolutionary aspects of diet: Fatty acids, insulin resistance and obesity. *Obesity: New directions in assessment and management.* Vanitallie, T.B., Simopoulos, A.P. Charles Press, Philadelphie, PA, É.-U., 241-261.

SIMOPOULOS, A.P., 1999. Essential fatty acids in health and chronic disease. *Am. J. Clin. Nutr.* 70: 560S-590S.

SIMOPOULOS, A.P., 2000. Human requirement for n-3 polyunsaturated fatty acids. *Poultry Sci.* 79: 961-970.

SIMOPOULOS, A.P., 2001. n-3 fatty acids and human health: defining strategies for public policy. *Lipids.* 36: S83-S89.

SIMOPOULOS, A.P., SALEM JR., N., 1992. Egg yolk as a source of long-chain polyunsaturated fatty acids in infant feeding. *Am. J. Clin. Nutr.* 55: 411-414.

SINCLAIR, H.M., 1952. Essential fatty acids and their relation to pyridoxine. *Biochem. Soc. Symp.* 9: 80-99.

SISCOVICK, D.S., RAGHUNATHAN, T.E., KING, I., WEINMANN, S., WICKLUND, K.G., ALBRIGHT, J., BOVBJERG, V., ARBOGAST, P., SMITH, H., KUSHI, L.H., COBB, L.A., COPASS, M.K., PSATY, B.M., LEMAITRE, R., RETZLAFF, B., CHILDS, M., KNOPP, R.H., 1995. Dietary intake and cell membrane levels of long-chain n-3 polyunsaturated fatty acids and the risk of primary cardiac arrest. *JAMA*. 274: 1363-1367.

STEFFENS, W., RENNERT, B., WIRTH, M., KRÜGER, R., 1999. Effect of two lipid levels on growth, feed utilization, body composition and some biochemical parameters of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum 1792). *J. Appl. Ichthyol.* 15: 159-164.

STEVENS, L.J., ZENTALL, S.S., DECK, J.L., ABATE, M.L., WATKINS, B.A., LIPP, S.R., BURGESS, J.R., 1995. Essential fatty acid metabolism in boys with attention-deficit hyperactivity disorder. *Am. J. Clin. Nutr.* 62: 761-768.

SUGIURA, S.H., DONG, F.M., RATHBONE, C.K., HARDY, R.W., 1998. Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. *Aquaculture*. 159: 177-202.

SURAI, P.F., SPARKS, N.H.C., 2001. Designer eggs: from improvement of egg composition to functional food. *Trends in Food Sci. Technol.* 12: 7-16.

SUWALSKY, M., RODRÍGUEZ, C., VILLENA, F., SOTOMAYOR, C.P., 2005. Human erythrocytes are affected by the organochloride insecticide chlordane. *Food Chem. Toxicol.* 43: 647-654.

TERANO, T., SHINA, T., YAMAMOTO, K., BAN, T., HIRAI, A., TAMURA, Y.S., KITAGAWA, M., 1997. Eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid inhibit DNA synthesis through inhibiting cdk2 kinase in vascular smooth muscle cells. *Ann. NY Acad. Sci.* 811: 369-377.

THOMASSEN, M.S., RØSJØ, C., 1989. Different fats in feed for salmon: influence on sensory parameters, growth rate and fatty acids in muscle and heart. *Aquaculture*. 79: 129-135.

TOCHER, D.R., BELL, J.G., MCGHEE, F., DICK, J.R., FONSECA-MADRIGAL, J., 2003. Effects of dietary lipid level and vegetable oil on fatty acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) over the whole production cycle. *Fish Physiol. and Biochem.* 29: 193-209.

TORSTENSEN, B.E., FRØYLAND, L., ØRNSRUD, R., LIE, Ø. 2004. Tailoring of a cardioprotective muscle fatty acid composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed vegetable oils. *Food Chemistry*. 87: 567-580.

TRAVIS, C., HATTEMER-FREY, H.A., 1991. Human exposure to dioxin. *Sci. Total Envir.* 104: 97-127.

TURCHINI, G.M., MENTASTI, T., FRØYLAND, L., ORBAN, E., CAPRINO, F., MORETTI, V.M., VALFRÉ, F., 2003. Effects of alternative dietary lipid sources on performance, tissue chemical composition, mitochondrial fatty acid oxidation capabilities and sensory characteristics in brown trout (*Salmo trutta* L.). *Aquaculture*. 225: 251-267.

VAN DEN BERG, M., BIRNBAUM, L., BOSVELD, A.T.C., BRUNSTRÖM, B., COOK, P., FEELEY, M., GIESY, J.P., HANBERG, A., HASEGAWA, R., KENNEDY, S.W., KUBIAK, T., LARSEN, J.C., ROLAF VAN LEEUWEN, F.X., DJIEN LIEM, A.K., NOLT, C., PETERSON, R.E., POELLINGER, L., SAFE, S., SCHRENK, D., TILLITT, D., TYSKLIND, M., YOUNES, M., WAERN, F., ZACHAREWSKI, T., 1998. Toxic equivalency factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for humans and wildlife. *Envir. Health Perspect.* 106: 775-792.

VAN GREENVENBROEK, M.M.J., ERKELENS, D.W., DE BRUIN, T.W.A., 1995. Do dietary fatty acids determine the amount of triglyceride and chylomicrons secreted by Caco-2 cells? O15 cell biology of lipoproteins and receptors. Oral session abstracts / Atherosclerosis, 115 (suppl.), S3-S42.

VIRKKUNEN, M.E., HORROBIN, D.F., JENKINS, D.K., MANKU, M.S., 1987. Plasma phospholipid essential fatty acids and prostaglandins in alcoholic, habitually violent, and impulsive offenders. *Biol. Psychiatry*. 22: 1087-1096.

WARD, O.P., SINGH, A., 2005. Omega-3/6 fatty acids: Alternative sources of production. *Process. Biochem.* 40: 3627-3652.

WINDELL, J.T., FOLTZ, J.W., SAROKON, J.A., 1978. Effect of fish size, temperature, and amount fed on nutrient digestibility of a pelleted diet by rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Trans. Am. Fish. Soc.* 107: 613-616.

YEHUDA, S., RABINOVITZ, S., CARASSO, R.L., MOSTOFSKY, D.I., 2002. The role of polyunsaturated fatty acids in restoring the aging neuronal membrane. *Neurobiol. Aging*. 23: 843-853.

YOSHIDA, S., YASUDA, A., KAWAZATO, H., SAKAI, K., SHIMADA, T., TAKESHITA, M., YUASA, S., KOBAYASHI, T., WATANABE, S., OKUYAMA, H., 1997. Synaptic vesicle ultrastructural changes in the rat hippocampus induced by a combination of α -linolenate deficiency and a learning task. *J. Neurochem.* 68: 1261-1268.

YOU DIM, K.A., MARTIN, A., JOSEPH, J.A., 2000. Essential fatty acids and the brain : possible health implications. *Int. J. Devl. Neurosci.* 18: 383-399.

Références en ligne

American Heart Association. [En ligne] www.americanheart.org. Visité le 17/05/05.

Canola Council of Canada. [En ligne] www.canola-council.org. Visité le 12/04/05.

Health Canada. [En ligne] <http://www.cfsan.fda.gov/~acrobat/haccpc09.pdf>. Visité le 02/02/07.

FAIR Agriculture and Fisheries [En ligne]
http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FAIR/ACTIONeqDndSESSIONeq2827200595ndDOCq7ndTBLeqEN_PROJ.htm. Visité le 02/02/07.

Food and Drug Administration (FDA) [En ligne]
http://www.fda.gov/ora/compliance_ref/cpg/cpgfod/cpg575-100.html. Visité le 02/02/2007.

Environnement Canada. [En ligne] www.msc.ec.gc.ca. Visité le 27/07/2005.