

ÉTUDE DE LA NUTRITION DES SAUMONS ET CONTRIBUTION À LA CRÉATION D'UNE FILIÈRE DE PRODUCTION DE SAUMONS LABEL ROUGE

THESE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

*présentée et soutenue publiquement en 2006
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Mathilde AUDIC

Née, le 25 juin 1979 à VANNES (Morbihan)

Directeur de thèse : Madame le Docteur Nathalie PRIYMENKO

JURY

PRESIDENT :
M. Claude MOULIS

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
Mme Nathalie PRIYMENKO
M. Jacques DUCOS de LAHITTE

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Toulouse, 2005

NOM :AUDIC

Prénom : Mathilde

Titre : Etude de la nutrition des saumons et contribution à la création d'une filière de production de saumons Label Rouge

Résumé :

De nombreuses études ont mesuré l'efficacité de stratégies alimentaires sur la qualité de la chair de saumons atlantique. De plus, des questions de pérennité des ressources halieutiques et de l'utilisation de ressources végétales de substitution se posent désormais en production aquacole. Cette thèse dresse un bilan des principaux paramètres influençant la qualité des saumons Atlantique, puis pose les bases scientifiques au développement d'une filière dans une démarche de développement durable environnemental et sociétal. Deux cycles d'élevage ont permis de mettre en place un nouveau cahier des charges Label Rouge. Avec une vitesse de croissance lente, le facteur k a été faible et le profil en acides gras de la chair s'est rapproché de celui des saumons sauvages, avec un ratio oméga 3/6 supérieur à 3,3. Les tests statistiques ont montré la position intermédiaire du saumon Label Rouge entre le saumon standard et le saumon sauvage.

Mots Clefs :

Nutrition, Alimentation, Qualité, Saumon Atlantique, Oméga 3, Label Rouge, Filière, Chair

English title : *Study of the nutrition of the Atlantic salmon, and contribution to the development of a new Label Rouge salmon industry.*

Summary :

Many studies measured the efficacy of dietary strategies on large Atlantic salmon's meat quality. Moreover the question of the sustainability of halieutic stocks and the use of substitute vegetable resources must be considered in fish farming industry. This thesis first analyses the main parameters having an effect on Atlantic salmon quality, and then sets scientific bases for the development of a salmon industry fully integrated into a sustainable development policy. Two farming cycles permitted to meet the new Label Rouge requirements. With a slow growth rate, k factor was low and the amount of fatty acid in meat was close to wild salmon with an omega 3/6 ratio greater than 3.3. Statistical tests showed that Label Rouge salmon quality is ranging between standard salmon and wild salmon.

Key Words :

Nutrition, Feeding, Quality, Atlantic salmon, Omega 3, Label Rouge, Salmon industry, Meat

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur	: M.	A. MILON
Directeurs honoraires	M.	G. VAN HAVERBEKE
	M.	J. FERNEY
	M.	P. DESNOYERS
Professeurs honoraires	M.	L. FALIU
	M.	C. LABIE
	M.	C. PAVAU
	M.	F. LESCURE
	M.	A. RICO
	M.	D. GRIESS
	M.	A. CAZIEUX
	Mme	V. BURGAT
	M.	J. CHANTAL
	M.	J.-F. GUELF
	M.	M. ECKHOUTTE

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

M.	BRAUN Jean-Pierre , <i>Physique et Chimie biologiques et médicales</i>
M.	CABANIE Paul , <i>Histologie, Anatomie pathologique</i>
M.	DARRE Roland , <i>Productions animales</i>
M.	DORCHIES Philippe , <i>Parasitologie et Maladies Parasitaires</i>
M.	EUZEBY Jean , <i>Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie</i>
M.	TOUTAIN Pierre-Louis , <i>Physiologie et Thérapeutique</i>

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

M.	AUTEFAGE André , <i>Pathologie chirurgicale</i>
M.	BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy , <i>Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie</i>
M.	DELVERDIER Maxence , <i>Anatomie pathologique</i>
M.	ENJALBERT Francis , <i>Alimentation</i>
M.	FRANC Michel , <i>Parasitologie et Maladies Parasitaires</i>
M.	HENROTEAUX Marc , <i>Médecine des carnivores</i>
M.	MARTINEAU Guy-Pierre , <i>Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour</i>
M.	PETIT Claude , <i>Pharmacie et Toxicologie</i>
M.	REGNIER Alain , <i>Physiopathologie oculaire</i>
M.	SAUTET Jean , <i>Anatomie</i>
M.	SCHELCHER François , <i>Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour</i>

PROFESSEURS 2^e CLASSE

Mme	BENARD Geneviève , <i>Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale</i>
M.	BERTHELOT Xavier , <i>Pathologie de la Reproduction</i>
M.	CONCORDET Didier , <i>Mathématiques, Statistiques, Modélisation</i>
M.	CORPET Denis , <i>Science de l'Aliment et Technologies dans les industries agro-alimentaires</i>
M.	DUCOS Alain , <i>Zootéchnie</i>
M.	DUCOS de LAHITTE Jacques , <i>Parasitologie et Maladies parasitaires</i>
M.	GUERRE Philippe , <i>Pharmacie et Toxicologie</i>
Mme	KOLF-CLAUW Martine , <i>Pharmacie -Toxicologie</i>
M.	LEFEBVRE Hervé , <i>Physiologie et Thérapeutique</i>
M.	LIGNEREUX Yves , <i>Anatomie</i>
M.	PICAVET Dominique , <i>Pathologie infectieuse</i>

INGENIEUR DE RECHERCHES

M.	TAMZALI Youssef , <i>Responsable Clinique équine</i>
----	---

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

Mme	MICHAUD Françoise , <i>Professeur d'Anglais</i>
M.	SEVERAC Benoît , <i>Professeur d'Anglais</i>

MAÎTRE DE CONFERENCES HORS CLASSE

M. JOUGLAR Jean-Yves, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAÎTRES DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

M. ASIMUS Erik, *Pathologie chirurgicale*
M. BAILLY Jean-Denis, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
M. BERGONIER Dominique, *Pathologie de la Reproduction*
M. BERTAGNOLI Stéphane, *Pathologie infectieuse*
Mme BOUCRAUT-BARALON Corine, *Pathologie infectieuse*
Mlle BOULLIER Séverine, *Immunologie générale et médicale*
Mme BOURGES-ABELLA Nathalie, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. BOUSQUET-MELOU Alain, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme BRET-BENNIS Lydie, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. BRUGERE Hubert, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
Mlle CADIERGUES Marie-Christine, *Dermatologie*
Mme CAMUS-BOUCLAINVILLE Christelle, *Biologie cellulaire et moléculaire*
Mme COLLARD-MEYNAUD Patricia, *Pathologie chirurgicale*
Mlle DIQUELOU Armelle, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. DOSSIN Olivier, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. FOUCRAS Gilles, *Pathologie du bétail*
Mme GAYRARD-TROY Véronique, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. GUERIN Jean-Luc, *Elevage et Santé Avicoles et Cunicoles*
Mme HAGEN-PICARD Nicole, *Pathologie de la Reproduction*
M. JACQUIET Philippe, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. JAEG Jean-Philippe, *Pharmacie et Toxicologie*
M. LYAZRHI Faouzi, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. MATHON Didier, *Pathologie chirurgicale*
M. MEYER Gilles, *Pathologie des ruminants*
Mme MEYNADIER-TROEGELER Annabelle, *Alimentation*
M. MONNEREAU Laurent, *Anatomie, Embryologie*
Mme PRIYMENKO Nathalie, *Alimentation*
Mme RAYMOND-LETRON Isabelle, *Anatomie pathologique*
M. SANS Pierre, *Productions animales*
Mlle TRUMEL Catherine, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. VERWAERDE Patrick, *Anesthésie, Réanimation*

MAÎTRES DE CONFERENCES CONTRACTUELS

Mlle BIBBAL Delphine, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
M. CASSARD Hervé, *Pathologie du bétail*
M. DESMAIZIERES Louis-Marie, *Clinique équine*
Mlle LE MINOR Odile, *Epidémiologie*
M. NOUVEL Laurent-Xavier, *Pathologie de la reproduction*
M. REYNOLDS Brice, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. VOLMER RE Romain, *Infectiologie*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

M. CONCHOU Fabrice, *Imagerie médicale*
M. CORBIERE Fabien, *Pathologie des ruminants*
Mlle LACROUX Caroline, *Anatomie pathologique des animaux de rente*
M. MOGICATO Giovanni, *Anatomie, Imagerie médicale*
Mlle PALIERNE Sophie, *Chirurgie des animaux de compagnie*

A MA MAMAN

*En témoignage d'affection et de reconnaissance
En retour de ses efforts et de son aide
pour placer mes gros cailloux avant les plus petits...*

A TOUTE MA FAMILLE

A TOUS MES AMIS

UN MERCI TOUT PARTICULIER A CEUX QUI ONT RENDU CE TRAVAIL
PASSIONNANT ET QUI PAR LEURS IDEES, LEUR VOLONTE D'ENTREPRENDRE,
ET LEUR CAPACITE A (SE) FEDERER ONT PERMIS AU PROJET D'ABOUTIR.

Merci à Corinne BOURGOIN

Merci à François THIEBAULT

A Gilles CHARPENTIER *pour son accueil dans sa société*

Et à Anne Gaëlle GROSDÉMANGE *pour son aimable collaboration*

Thanks to Gustav WITZØE, Thomas JESSEN and Eva HAUGEN from SALMAR

A NOTRE PRESIDENT DE THESE

Monsieur le Professeur Claude MOULIS
De l'Université de Pharmacie de Toulouse

*Qui nous a fait l'honneur d'accepter notre jury de thèse
Hommage respectueux*

A NOTRE JURY DE THESE

Madame le Professeur Nathalie PRIYMENKO
De l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

*Qui m'a accompagnée dans toute l'évolution de ce projet ...
et des précédents que j'ai initiés au cours de mon cursus vétérinaire.*

*Qui m'a consacré temps, patience et attention,
Et a permis par ses conseils l'avancée des points les plus délicats de ce sujet*

Merci pour l'accueil chaleureux que vous m'avez toujours réservée

*Veillez trouver ici l'expression de notre reconnaissance,
et le témoignage de toute notre estime.*

Monsieur le Professeur Jacques DUCOS de LAHITTE
De l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

*Que nous remercions vivement de nous avoir fait
l'honneur de participer à notre jury de thèse*

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
I- GENERALITES SUR LES PARTICULARITES PHYSIQUES DES POISSONS	2
A. Historique	2
B. Particularités physiologiques et nutritionnelles des poissons	3
<i>Zoologiques</i>	4
<i>Physiologiques</i>	4
<i>Ecologiques</i>	4
C. Ontogenèse, développement et mise en place de la physiologie digestive des poissons	5
II- BASES DE LA NUTRITION DES SAUMONS	12
A. Anatomie et physiologie du tube digestif.....	12
a) <i>Morphologie du tube digestif des saumons</i>	12
b) <i>Modalités et efficacité de la digestion</i>	17
B. Comportement alimentaire et régulation de l'ingestion	19
a) <i>Régulation physiologique de l'ingestion</i>	19
b) <i>Facteurs agissant sur l'ingéré volontaire</i> :	19
C. Nutrition énergétique.....	25
D. Nutrition protéique	28
a) <i>Particularités du métabolisme protéique chez le poisson</i>	28
b) <i>Besoins en protéines et acides aminés indispensables</i>	31
c) <i>Couverture des besoins</i>	35
E. Nutrition lipidique	38
a) <i>Rappels sur l'utilisation digestive et le métabolisme des lipides</i>	38
b) <i>Besoins en acides gras essentiels</i>	43
c) <i>Influence des lipides alimentaires sur la composition corporelle et la qualité des poissons</i>	46
F. Nutrition glucidique : intérêts et limites des apports glucidiques	49
a) <i>Digestion – digestibilité</i>	49
b) <i>Métabolisme du glucose</i>	50
G. Vitamines	55
H. Minéraux	57
I. Pigments.....	59
a) <i>Généralités</i>	59
b) <i>Digestibilité et principales sources alimentaires</i>	59
c) <i>Métabolisme</i>	60
III- PRATIQUE DE L'ALIMENTATION DES SAUMONS	62
A. Matières premières et additifs utilisés dans l'alimentation des saumons.....	62
a) <i>Farines et huiles de poisson</i>	62
b) <i>Matières premières d'origine végétale</i>	67
c) <i>Organismes unicellulaires</i>	69
d) <i>Additifs et produits purifiés</i>	70
B. Facteurs antinutritionnels	71
C. Formulation des aliments en aquaculture.....	72
D. Fabrication des aliments.....	73
E. Distribution de l'aliment aux poissons.....	78
a) <i>Alimentation de préparation à l'abattage</i>	81
b) <i>Ajustement de la ration en fonction de l'environnement</i>	82
c) <i>Choix du mode de distribution</i>	82
IV- EFFETS DE L'ALIMENTATION SUR LA QUALITE DES PRODUITS	84
A- Effet de l'alimentation sur la qualité de la chair et conséquences sur la santé humaine	84
a) <i>Texture</i>	84

b)	<i>Gaping</i>	85
c)	<i>Composition</i>	87
d)	<i>Composition en acides gras</i>	87
B-	Effets de la substitution des farines et des huiles de poissons par des végétaux.....	91
a)	<i>Effet métabolique</i>	91
b)	<i>Effet pathologique</i>	92
C-	Effet de l'alimentation sur la résistance aux maladies	93
a)	<i>Impact de l'alimentation sur l'apparition et la prévention des cataractes</i>	93
b)	<i>Impacts de l'alimentation sur l'infestation par les poux de mer</i>	97
c)	<i>Effet de l'alimentation sur la résistance aux maladies infectieuses</i>	99
V-	EXPERIMENTATIONS A ECHELLE INDUSTRIELLE DES CARACTERISTIQUES FUTURES DU LABEL ROUGE	
	102	
A.	Introduction : principales exigences.....	102
	<i>Qu'est ce que le Label Rouge, et comment constituer un cahier des charges ?</i>	103
	<i>Le cahier des charges « Océan qualité », les grandes lignes</i>	104
B.	Expérimentation « Grieg »	108
1.	<i>Protocole d'étude : matériel et méthode</i>	109
2.	<i>Résultats et discussion</i>	112
C.	Expérimentation « Salmar »	118
1.	<i>Matériel et méthodes</i>	118
2.	<i>Résultats et discussion</i>	121
	Conclusion 129	
	Annexe 1 : Quelques définitions et abréviations 132	
	Annexe 2 : Equivalences des noms de poissons 138	
	Annexe 3 : Bibliographie 139	

INTRODUCTION

L'histoire du saumon a marqué toutes les civilisations et tous les continents. C'est un poisson ancien (6 millions d'années) dont l'importance culturelle persiste encore. Sa capacité de se déplacer entre l'eau douce et l'eau salée lui a permis de survivre à au moins cinq grandes glaciations. Poisson mythique, objet de rituel initiatique, il était chez les peuples anciens un don de la «Déesse Terre» et seule la quantité nécessaire à se nourrir devait être pêchée. Les rituels sont encore perpétrés aujourd'hui chez les indiens Kwakiutl au Canada. Il fut l'objet de convoitise et de conflits sanglants (TERRE-NEUVE, 1708). Enfin, en France, on retrouve la trace d'une clause spéciale «saumon» dans les contrats de louage dans l'histoire médiévale. Quelles que soient les cultures ou les Continents, dans toutes les chroniques médicales ou gastronomiques anciennes, le saumon est cité pour sa qualité et ses bienfaits nutritionnels. Les saumons constituent en effet une source majeure de protéines et de lipides, et sont particulièrement riches en acides gras polyinsaturés.

Autrefois et encore aujourd'hui sauvage, le saumon a été «domestiqué» à la fois pour répondre à une demande de plus en plus importante et à une organisation plus industrielle de la production et de la transformation, l'aquaculture constituant une des solutions d'intensification de production à un moment où les ressources marines diminuent.

Cette intensification s'accompagne souvent d'une modification des paramètres qualitatifs et d'un risque de dérive par rapport à l'espèce native sauvage. L'objectif reste, certes, de pouvoir répondre à une demande alimentaire croissante, mais aussi de préserver les ressources maritimes naturelles dont les saumons sauvages.

Dans le même temps, le consommateur est aujourd'hui de plus en plus sensible au développement durable et aux conditions d'élevage des produits qu'il consomme. On assiste désormais à une consommation «santé et sécurité» mais aussi «sociétale et éthique».

Or, cet élevage «intensif» n'est pas sans critiques et des scientifiques et des organisations s'élèvent pour démontrer les incidences de ces piscicultures sur la santé des saumons sauvages et l'équilibre environnemental.

Des entrepreneurs, comme Gilles Charpentier, ont décidé de fédérer les savoir-faire pour améliorer à la fois les qualités gustatives et organoleptiques des saumons, mais aussi adapter les conditions d'élevage aux contraintes environnementales du développement durable, en recherchant toutes les pistes susceptibles, d'utiliser les écosystèmes tout en les préservant pour les générations à venir.

Le travail présenté dans cette thèse est d'abord la mise en exergue de la recherche d'une qualité optimum d'un produit fini, face aux contraintes physiologiques et nutritionnelles du saumon d'élevage pour parvenir à un cahier des charges de production techniquement, économiquement et écologiquement viable. L'aboutissement de cette recherche étant la reconnaissance d'un nouveau LABEL ROUGE, non plus seulement attribué sur des critères de méthode de transformation du produit, mais impliquant l'ensemble d'une filière de «l'élevage à l'assiette»

La thèse qui suit est organisée de la manière suivante : les deux premières parties dressent un tableau des généralités et des particularités des poissons, avec un développement sur l'espèce plus particulière des saumons et les bases de sa nutrition. La troisième partie abordera un examen au jour le jour de la pratique de l'alimentation des saumons d'élevage, de la composition et des variantes dans les aliments en aquaculture des saumons dans les différentes phases d'élevage, ainsi que des techniques de fabrication industrielle des aliments. Nous traiterons également ici, des influences des pratiques d'élevage et plus particulièrement de l'alimentation sur la qualité du saumon et du produit final. La thèse s'achève par la réalisation d'expérimentations à l'échelle industrielle de l'élevage du saumon labellisable avec une analyse puis une sélection des paramètres alimentaires, comportementaux et environnementaux permettant de valider ou d'adapter le cahier des charges pour aboutir aux critères de qualité retenus pour l'appellation Label Rouge «OCEAN QUALITE».

I- GENERALITES SUR LES PARTICULARITES PHYSIQUES DES POISSONS

A. Historique

D'après Pennell, (1996), les salmonidés sont depuis longtemps considérés comme une source alimentaire par les hommes. Des peintures préhistoriques en France et en Amérique du sud représentent clairement des poissons salmonidés. Les périodes majeures de migration de saumons constituaient une manne de nourriture providentielle avant l'installation de l'hiver. Les écrits les plus anciens traitant des saumons sont attribués à PLINT l'ancien, dans *Historia Naturalis*. Cet ouvrage date du 1^{er} siècle, et c'est là que le mot *Salmo* est utilisé pour la première fois. Le cycle de vie du saumon Atlantique a été décrit par Hector Boece, de l'Université D'Aberdeen, qui a décrit les migrations de retour en rivière, le comportement de ponte et l'éclosion du frai (Boece, 1527). Il a cependant commis une erreur qui s'est propagée jusqu'au 19^{ème} siècle : il pensait que la durée de vie en mer, séparant le départ de la rivière au retour pour pondre, n'était que de vingt jours.

Pendant des siècles, l'homme est sorti en mer pour se nourrir. Jusqu'à une époque très récente, les pêcheurs ne pouvaient pas s'aventurer à plus de quelques miles pour capturer des espèces essentiellement côtières avec des équipements limités. C'est seulement depuis les 50 dernières années que la population humaine grandissante, équipée de moyens toujours plus sophistiqués, a commencé à surexploiter les ressources biologiques de la planète, et les ressources marines en particulier. Des centaines de millions de tonnes d'organismes vivants ont été retirés des océans et des millions de tonnes de polluants y ont été déversés.

Bien que de plus en plus de technologie et d'énergie soient déployées pour augmenter les captures de poissons, les quantités totales prélevées sont plafonnées à environ 110 millions de tonnes annuelles et sont actuellement en régression, ce qui est un signe clair de surexploitation. Nous avons tant besoin de ces ressources pour satisfaire nos besoins que même des espèces de grande profondeur, qui peuvent prendre 30 ans pour arriver à la maturation commerciale, sont exploitées sans précaution. L'aquaculture est aujourd'hui considérée comme l'une des voies d'avenir pour produire une partie des poissons nécessaires aux besoins de l'humanité. Aujourd'hui, plus de 25% des poissons, mollusques et crustacés mis sur le marché sont produits par l'aquaculture et cette proportion est en très nette augmentation. En pisciculture, on distingue deux types de productions : les élevages de poissons végétariens et de poissons carnivores.

Dès la fin du 19^{ème} siècle, la production piscicole s'est étendue à des espèces carnivores élevées en bassins. Dès lors, l'alimentation des poissons d'élevage est devenue dépendante des apports de l'homme. Les granulés secs sont apparus à la fin des années 50 aux Etats-Unis et au début des années 60 en Europe. La pisciculture pouvant ainsi bénéficier d'outils similaires aux espèces terrestres, il restait cependant à étudier les besoins nutritionnels des poissons. Les difficultés d'étude liées au milieu et aux particularités nutritionnelles des poissons ont représenté et représentent encore des handicaps naturels aux expérimentations (Guillaume *et al*, (1999)): comment quantifier l'ingéré et dresser un bilan nutritionnel sur un saumon adulte ou juvénile, ou sur une crevette ?

B. Particularités physiologiques et nutritionnelles des poissons

Les saumons étudiés dans cette étude sont de l'espèce *Salmo salar*, couramment appelé saumon Atlantique. Ils sont originaires de l'Atlantique nord. La zone ouest de leur « territoire » s'étend de la nouvelle Angleterre à la baie d'Ungava. Leur berceau inclut également l'Islande et le Groenland et s'étend à l'est du nord du Portugal à la mer de Kara (d'après Pennell, (1996).

Ils passent entre un et cinq ans en mer et pèsent entre un et trente kilos à maturité. Le saumon Atlantique présente l'avantage d'avoir une bonne valeur commerciale. Il est facile à manipuler et peut être élevé en extérieur. Néanmoins, son élevage se réalise dans deux types de milieux différents : en rivière et en mer.

En rivière (eaux courantes), les saumons agissent en tant qu'individus, protégeant leur territoire et attendant qu'une proie passe dans leur colonne d'eau. Dans l'océan, leur stratégie alimentaire est différente. En effet, bien qu'ils vivent dans un milieu riche en poissons, les saumons doivent activement rechercher leurs proies dans un espace plus ou moins étendu. Les saumons adoptent alors une stratégie de groupe.

Les particularités nutritionnelles des poissons ont une origine zoologique, biologique ou écologique (Guillaume *et al*, (1999)). Les poissons forment la classe la plus primitive des vertébrés et présentent des caractères archaïques comme l'importance des mécanismes d'absorption entérocytaire par pinocytose ou l'imperfection de la régulation de la glycémie après l'ingestion de glucides. De manière non exhaustive, les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 1, qui met en exergue les particularités classées par origine et conséquences sur le plan du métabolisme.

Les poissons peuvent être atteints par des maladies non infectieuses (d'après Yannong, (2003)) :

- résultant de problèmes liés à la qualité de l'eau comme des niveaux impropres d'ammonium, de nitrites, d'oxygène dissous, d'alcalinité, de pH, de salinité, de nitrates et de résidus d'ozone ;
- résultant des erreurs de rationnement aboutissant entre autres à des stéatoses hépatiques, des déformations du squelette.

Les poissons peuvent également être atteints par des agents pathogènes :

- des bactéries opportunistes usuelles (*Aeromonas*, *Vibrio*, *Columnaris*) des streptocoques et des myxobactéries
- des maladies parasitaires usuelles liées à des protozoaires ciliés (*Trichodinides*, *Ichtyobodo*), les dinoflagellés (*Amyloodinium*), les monogènes (*Dactylogyridés*, *Gyrodactylidés*, *Capsulidés*).

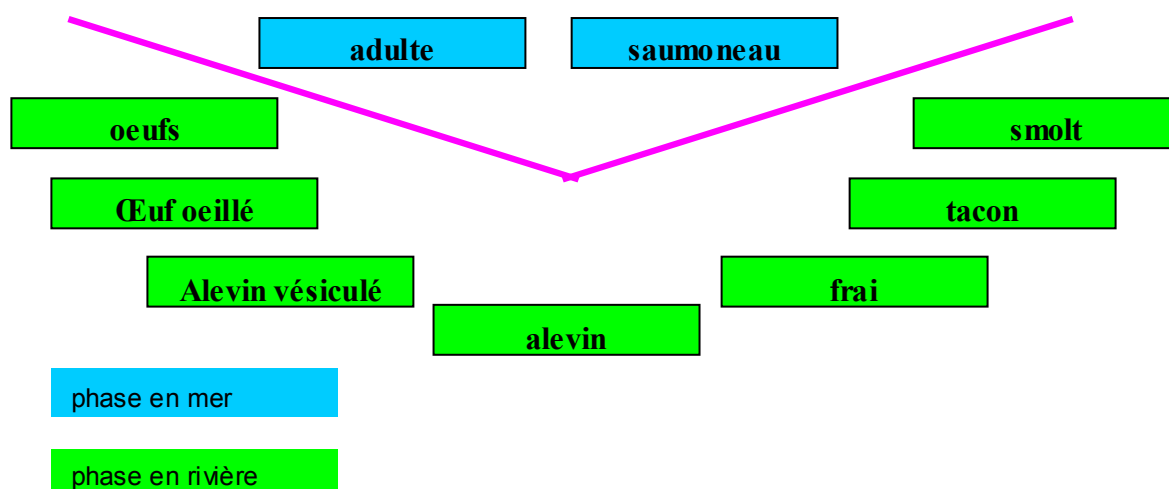
Tableau 1 , Résumé des principales conséquences des particularités zoologiques, physiologiques et écologiques des saumons (d'après Guillaume *et al* , (1999))

<p>Zoologiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - 40000 espèces au moins 	<p>Grande diversité interspécifique et variabilité des besoins (saumon vs truite..)</p>
<p>Physiologiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ectothermie - Ammoniothélie 	<p>La température influence la dynamique des fonctions digestives. La vie n'est possible que dans certaines conditions de fluidité des membranes cellulaires (incorporation massive d'AGPI variable en fonction de la température ambiante).</p> <p>Les besoins énergétiques sont faibles mais variables avec la température. L'utilisation nette de l'énergie des protéines est plus élevée par rapport aux uréothéliques. L'ammoniaque libre diffuse facilement à travers la membrane branchiale. L'ammoniaque ionisé est échangé à l'aide du sodium (Na⁺) et éliminé par transport actif.</p>
<p>Ecologiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - température moyenne basse - grande densité du milieu, bonne portance (vs air) - faible teneur en oxygène - diffusion lente des molécules dans l'eau - richesse du milieu en certains éléments - chaînes trophiques aquatiques avec beaucoup de sources protéiques, peu de sources glucidiques - abondance des acides gras polyinsaturés 	<p>La flore intestinale joue un rôle limité. Le maintien de la fluidité membranaire est difficile et détermine un besoin en acides gras à bas point de fusion.</p> <p>L'importance du squelette est réduite. Les besoins en calcium et phosphore sont faibles.</p> <p>Afin d'obtenir la quantité d'oxygène dont ils ont besoin, les poissons mettent en œuvre une ventilation considérable. Ils ont fréquemment recours à l'anaérobiose. Le muscle blanc est hypertrophié.</p> <p>Les attractants alimentaires jouent un rôle particulier.</p> <p>Des minéraux dissous sont apportés par le milieu lui-même.</p> <p>Les sources d'énergie sont utilisées différemment (rendement énergétique efficace à partir du catabolisme des protéines et utilisation limitée des glucides). Le saumon Atlantique est une espèce euryphagique* carnivore (planctonivore, insectivore, piscivore)</p> <p>Capacité de bioconversion réduite des acides gras poly-insaturés.</p>

C. Ontogénèse, développement et mise en place de la physiologie digestive des poissons

Comme nous l'avons évoqué plus haut, le cycle de vie du saumon se déroule dans deux milieux de vie différents : c'est une espèce euryhaline. Les juvéniles vivent en eau douce dans des cours d'eau. Les stades de vie post-juvéniles à adultes se vivent en eau de mer avant de retourner à leur rivière d'origine pour la reproduction. Selon « le saumon sauvage de l'Atlantique à bout de souffle », la majorité de la vie d'un saumon se déroule en mer. Le cycle de vie d'un saumon peut être schématisé de la manière suivante (figure 1):

Figure 1 : dénomination des saumons aux principaux stades de vie.(d'après Radix, (2000))



Le **Tableau 2** reprend les résultats d'une étude réalisée sur des stades d'eau douce et les compare aux valeurs usuelles des durées et températures d'élevage. A titre indicatif, la durée et les performances de chaque stade de vie en eau douce sont indiqués dans la dernière colonne (d'après Radix, (1998))

Délais	Date début	Date fin	Nombre de jours	mortalité	Température moyenne	Durée usuelle en degrés jours*
Achat des oeufs à début de nourrissage	17-01	14-07	180		3,1 et 12	500
Fécondation à éclosion	19-01	25-02	37	0,6%	2,3	300
Éclosion à œuf ocellé	26-02	14-04	16	0,4%	6	100
Éclosion à 5g (alevin non vésiculé)	26-02	7-07	100	IPN 37,7%	11,8	150
5g à transfert en mer	08-07	30-10	114	0,6%	12,1	

On remarque deux éléments importants : la présence d'une colonne « nombre de degrés jours ». Le métabolisme des poissons étant dépendant de la température extérieure, leur vitesse de croissance et leur degré d'alimentation dépend étroitement de la température ambiante. Les références utilisées en élevage pour chaque stade de vie ne sont donc pas exprimés en nombre de jours mais en nombre de « degrés jours » après éclosion.

On trouve également un pic de mortalité entre les stades œuf ocellé et alevin vésiculé lié à un épisode de Nécrose Infectieuse Pancréatique (IPN). L'IPN est une maladie virale entraînant des pertes sévères majoritairement en eau douce, mais également en eau salée. Elle est provoquée par un birnavirus aquatique qui est transmis par l'eau. Elle affecte tout d'abord les poissons les plus grands et robustes. L'IPN se manifeste par une pigmentation plus sombre, une exophtalmie, une distension abdominale et un gonflement de la zone anale. En interne, les organes prennent une

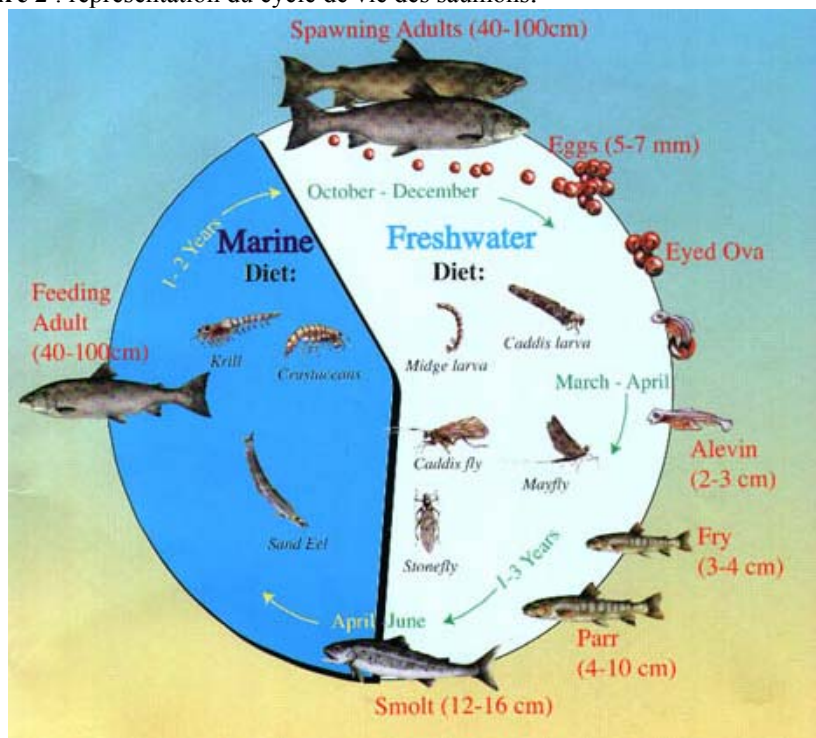
apparence générale hémorragique. La cavité abdominale est remplie d'un fluide translucide jaune. L'intestin postérieur contient une substance gélatineuse mucoïde qui est pathognomonique de l'infection par le virus de l'IPN.

Les individus qui résistent restent porteurs et peuvent réexprimer la maladie à l'occasion d'un stress. Lors d'un transfert en mer par exemple, les meilleurs poissons succombent les premiers. Les pertes en mer peuvent aller jusqu'à 10% du groupe mais peuvent être minimisées en s'assurant que les différents lots de poissons transférés dans un élevage soient tous de la même origine, qu'ils aient rapidement accès à une nourriture à volonté, en enlevant les poissons morts et moribonds, et en ne mélangeant pas des poissons d'élevages indemnes d'IPN et d'élevages contaminés.

La figure 2 schématise sur un même dessin le cycle de vie des saumons et le régime alimentaire de chaque stade. Le disque est divisé en deux parties décrivant l'importance relative de la phase de vie en eau douce (fond blanc) et de la phase de vie marine (fond bleu). A l'extérieur du disque, sont figurés l'aspect des saumons à chaque stade : les adultes matures (Spawning adults) pondent des œufs (eggs), qui une fois fécondés, évoluent vers le stade œuf oeuillé (eyed ova). Après éclosion les « larves » sont appelées alevins (alevin) et vont commencer à s'alimenter dès ouverture de la bouche et résorption progressive de la poche vitelline. Le frai (Fry) est une sorte de petit poisson qui diffère de la forme adulte principalement par ses proportions et sa couleur sombre. Le stade suivant est le tacon (parr), qui est un petit poisson parfaitement adapté à la vie en eau douce. Il vit au fond de gravières.

L'étape de vie assurant la transition physiologique entre la vie en eau douce et en eau de mer est la smoltification*. Le poisson est alors appelé « smolt ». Il est transféré en mer lorsqu'il a atteint un poids d'environ 80 g. Une fois en mer, le saumon adulte continue sa croissance et est appelé successivement saumoneau puis saumon. Il y séjourne au moins une année, 14 mois (d'après Pennell, (1996)) avant maturation sexuelle puis retour à sa rivière d'origine.

Figure 2 : représentation du cycle de vie des saumons.



En eau douce, le régime des poissons est majoritairement constitué de larves d'insectes et de petits insectes. En mer, les poissons consomment soit du krill, des crustacés ou des petits poissons.

Une femelle produit en moyenne 2000 œufs par kg de poids vif (d'après V.Radix, (1998)). Il faut environ 10 ml de sperme pour assurer une fécondation efficace de ces 2000 œufs. 24 heures après

fécondation, il ne faut plus manipuler les œufs, et ce jusqu'au stade œuf oeuillé (env. 100 °j) de manière à éviter toute mortalité durant l'embryogenèse.

L'éclosion a lieu pendant la phase de croissance intense qui suit la fécondation. La taille des embryons dépend majoritairement de la température d'incubation. Certains facteurs peuvent cependant précipiter la consommation de ces réserves comme un rythme et une intensité d'éclairement soutenus qui augmentent l'agitation et les dépenses énergétiques par l'activité de nage. L'éclosion a lieu en même temps pour tous les œufs, indépendamment de la taille des œufs, mais la masse maximale à jeun est atteinte légèrement plus tard pour les alevins issus des gros œufs : elle se produit environ à 300 °j (soit 30 jours à 10°C par exemple). La taille des alevins est proportionnelle à celle des œufs, les plus gros alevins étant les plus viables.

L'utilisation du vitellus par l'embryon dépend de la température ambiante. La résorption de la vésicule vitelline est en moyenne achevée 150j après éclosion. Lorsque la bouche s'ouvre (5^{ème} jour), les « larves » ont encore des réserves dans le vitellus qui leur permettent de couvrir une période d'adaptation à l'alimentation.

Le développement des larves se poursuit par la différenciation des nageoires, la croissance du foie, la croissance et la différenciation de la surface d'échange respiratoire branchiale, le déclin de la respiration cutanée. Les alevins de saumon ont un estomac fonctionnel au moment du premier repas. Chez les poissons, les jeunes individus sont appelés larves à partir du moment où ils commencent à s'alimenter jusqu'à ce qu'ils aient acquis leur forme adulte (c'est-à-dire à la suite de la smoltification). Les larves sont petites, avec de forts taux de croissance situés entre 20 et 25%, et de forts taux de consommation d'aliment de 20% du poids du corps (en matière sèche) par jour jusqu'au poids de 1g vs moins de 1% du poids du corps par jour pour des saumons en mer (d'après Pennell (1996)) et une différenciation incomplète de certains organes. Ce larves sont appelées alevins chez les saumons.

La fin du cycle embryonnaire est marquée par l'ouverture de la bouche qui a lieu après celle de l'œsophage. Avec l'ouverture de la bouche, l'activité des enzymes pancréatiques comme l'amylase, la trypsine et la chymotrypsine augmentent fortement, et ce indépendamment de la prise de nourriture (d'après Guillaume *et al*, (1999)). Au fur et à mesure de la multiplication des villosités intestinales, le potentiel digestif de la muqueuse intestinale s'accroît. Chez les jeunes larves, le cytosol des entérocytes joue un rôle majeur dans la digestion (enzyme leucine - alanine peptidase) alors que chez les adultes, les enzymes de la bordure en brosse sont prédominantes. Les larves sont capables de moduler leurs activités enzymatiques en réponse à la composition biochimique de l'aliment : ainsi, en réponse à la présence de phosphoprotéines dans l'aliment, l'activité de la phosphatase alcaline est augmentée.

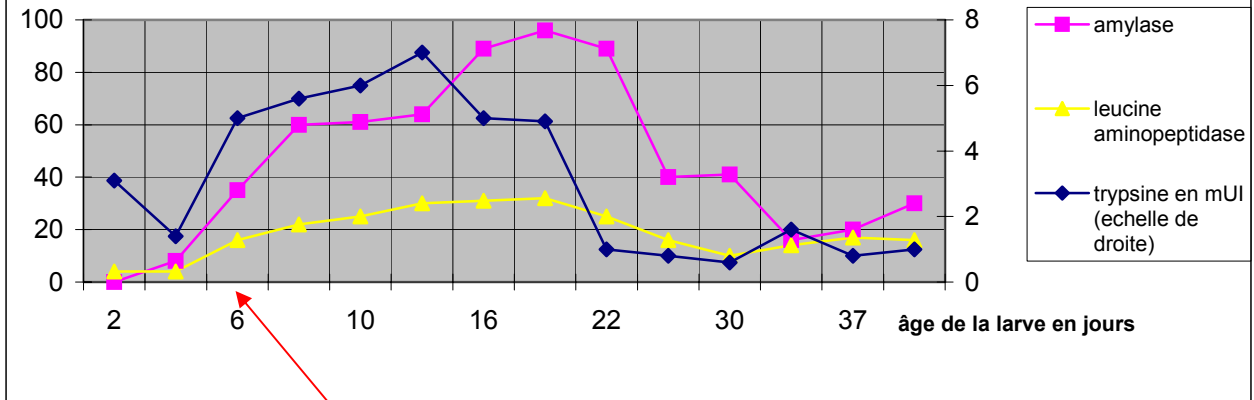
La figure 3 est un exemple de l'évolution des activités spécifiques de quelques enzymes digestives chez les larves de poissons marins (d'après Guillaume *et al*, (1999)) ; Chez les saumons, ce n'est qu'après trois semaines à un mois que l'animal a acquis un mode de digestion de type adulte (diminution des enzymes cytosoliques au profit de l'apparition des enzymes de la bordure en brosse). Selon Buddington *et al*, (1987, 1997) cité dans Houlihan *et al*, (2001), les poissons adultes ont encore la faculté d'adapter la sécrétion d'enzymes ainsi que le transport et l'absorption des nutriments afin de combler une modification de l'alimentation.

Cette capacité semble être limitée pour les poissons carnivores en particulier. Les coefficients d'utilisation digestive (CUD) atteignent en général les valeurs définitives dès le troisième jour après un changement d'aliment.

Figure 3: Evolution de l'activité spécifique de certaines enzymes digestives chez les larves de poissons marins au cours du développement.

UI: unité internationales de mesure de l'activité enzymatique.

mUI:mili-unité

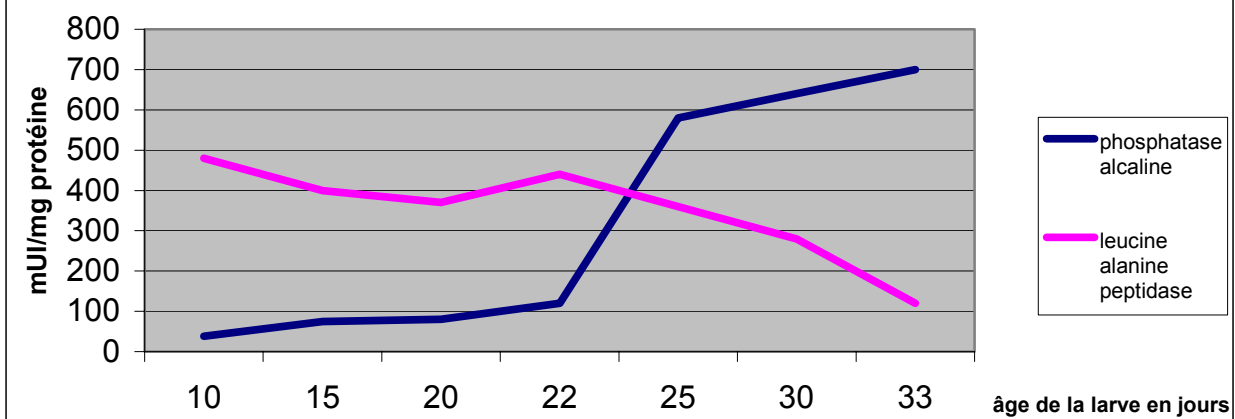


Ouverture de la bouche

Les diminutions d'activité observées sur ces courbes ne correspondent pas à une baisse de la capacité digestive globale de la larve, elles sont liées à l'apparition de nouvelles enzymes qui diminue l'importance relative des premières enzymes présentes.

La séquence d'apparition des enzymes est programmée génétiquement. Si l'on compare un aliment composé au régime alimentaire naturel des larves à base de proies vivantes, la non perturbation de la séquence normale est un critère de bonne adaptation à l'aliment. L'addition de 10% d'acides aminés libres dans un aliment composé permettrait d'améliorer l'efficacité des enzymes pancréatiques. De même, l'incorporation de 12% d'hydrolysats protéiques limite le retard à l'apparition des enzymes de la bordure en brosse, et améliore ainsi la croissance et le taux de survie (d'après Zambonino Infante et Cahu (1994) cité dans Guillaume *et al*, (1999)).

Figure 4: Variation de l'activité d'enzymes des entérocytes au cours du développement de larves: augmentation d'une enzyme de la bordure en brosse, la phosphatase alcaline, et décroissance d'une enzyme cytosolique, la leucine-alanine peptidase



Au départ, les alevins issus d'un même lot présentent une disparité de taille inférieure à 15%. Avec le temps, la disparité augmente, les plus petits ayant moins accès à la nourriture que les plus gros. Des relations conflictuelles apparaissent au moment des repas. Les individus les plus gros peuvent également développer un comportement de cannibalisme.

Il existe de nombreuses malformations. Elles sont souvent liées à la température, à des carences et des déséquilibres nutritionnels. Par exemple, le jeûne s'accompagne d'un aplatissement de la tête

et d'une exophtalmie, une carence en vitamine C provoque l'érosion de la nageoire caudale et des malformations branchiales. Certaines infections microbiennes peuvent aussi être à l'origine de malformations.

Les alevins de saumons sont nourris à base de miettes d'aliments secs. Comme pour les proies vivantes, les particules d'aliment doivent être présentes en grande quantité autour des larves qui ne consomment que celles qui sont très proches. La concentration de particules en suspension doit donc être maintenue à un niveau suffisant, grâce à la répartition des repas sur toute la durée du nyctémère.

Le transit intestinal des larves est bien plus rapide que celui des poissons adultes (1h vs 10h), aussi, elles doivent prendre de nombreux repas au cours de la journée. La dynamique de l'eau dans les bacs conditionne la prise alimentaire des poissons : l'eau doit être régulièrement renouvelée, mais la chute des particules au fond doit être ralentie par un courant latéral, par exemple.

Le repérage des particules par les larves est surtout visuel. Les larves sont sensibles au contraste entre l'aliment et son environnement. Des attractants tels que les acides aminés alanine, bétaïne et glycine peuvent être ajoutés aux aliments.

La granulométrie des miettes doit être adaptée à la taille de la bouche des poissons et la composition des miettes doit être la plus homogène possible. Cette homogénéité est conditionnée par la taille des particules des matières premières qui doit être inférieure à celle des miettes. Des particules de 200 à 400 µm peuvent être utilisées à partir du 30^{ème} jour après éclosion, soit 25 jours après le début du nourrissage.

Au cours de la vie en eau douce : quatre paramètres majeurs doivent être maîtrisés :

- **la sélection des œufs en particulier sur la taille,**
- **la maîtrise de l'environnement d'élevage et en particulier des conditions de température et d'éclairage,**
- **le régime alimentaire à la fois sur le plan de sa composition, de son équilibre, de la taille des particules et sur la distribution,**
- **l'hygiène**

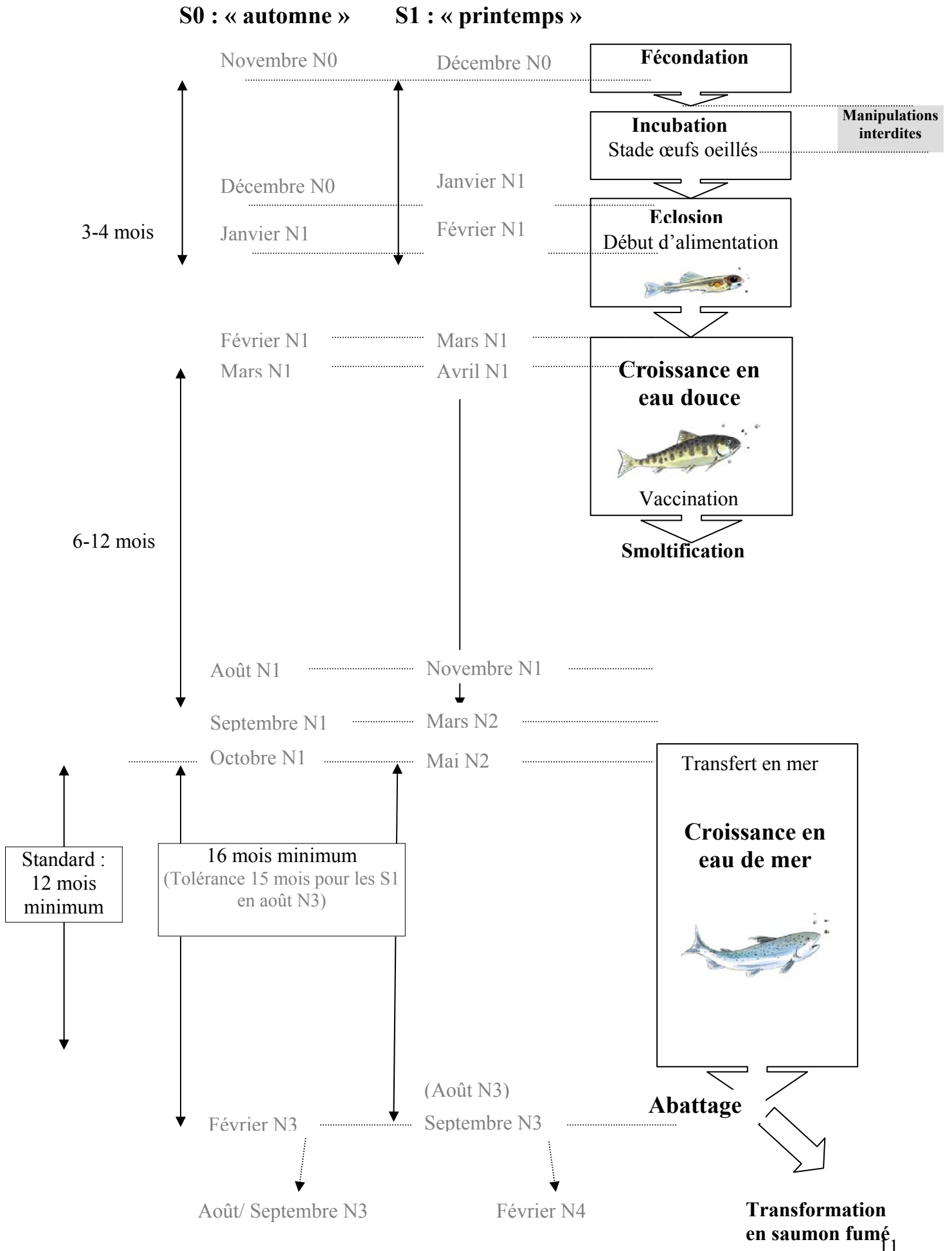
Après une première phase de vie en eau douce, les saumons vivent une phase de transformation : la smoltification. En fonction de leur âge à ce moment, les saumons sont classés en S0, S1 et S2 car les générations ont des vitesses de croissance différentes (vitesses de croissance supérieures pour les générations S1 et S2). La figure 5 (page 15), met en parallèle la chronologie des différentes étapes d'élevage de saumons S0 et S1. Tous deux sont issus d'œufs fécondés entre les mois de novembre et décembre de l'année n0 qui ont éclos deux mois plus tard. Les smolts S0 sont mis en mer dès leur premier automne après éclosion (en Janvier), soit 10 mois après éclosion. Les smolts S1 sont transférés en mer au printemps de l'année suivante, soit 17 mois après éclosion.

Les saumons transférés en mer en mai (génération S1) accumulent plus de gras au début de l'été que les saumons de la génération S0. La durée de la phase de vie en mer dépend du poids cible, de la vitesse de croissance, des conditions environnementales et nutritionnelles. Les saumons de filières de production standard restent en mer en moyenne 12 mois voire 11. Les saumons de filières de production Label Rouge, Bio restent en mer entre 14 et 16 mois. Le poids moyen d'un saumon destiné au marché français est de 5,4 kg. Comme le smolt est transféré en mer à un poids de 80 g, le gain de poids est de 5,3 kg en 12 à 16 mois (soit un gain de poids entre 5,3 et 4,1 kg par an).

Par comparaison, on sait qu'un saumon mature a au moins passé 14 mois en mer : l'on comprend alors que lorsque la durée d'élevage est allongée, l'éleveur a plus de risques de pertes de poissons, en particulier à cause de la présence de poissons matures qui sont retirés de la consommation. Lors de la maturation, les saumons subissent des transformations qui rendent leur chair impropre à la consommation. En effet, la chair perd sa coloration, prend une texture molle et un goût désagréable. De plus ces poissons sont plus agressifs envers leurs congénères, et arrêtent de manger.

De plus, des mesures réalisées sur des saumons sauvages, retournant dans leur rivière natale au bout de 1 à 4 ans ont montré que le taux de croissance annuel moyen de saumons sauvages norvégiens était de 4,1 kg par an rivières norvégiennes (Jensen, (2004)). Les productions soumises à signe officiel de qualité visent à obtenir des taux de croissance similaires aux saumons sauvages.

Figure 5 : Logigramme de l'élevage des saumons *Salmo salar* page 50 du référentiel Label Rouge Océan Qualité,

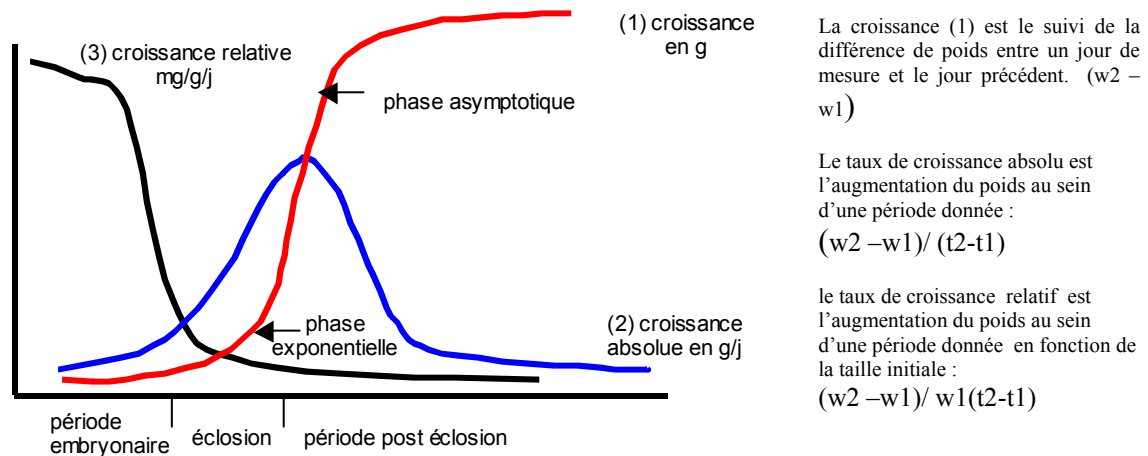


II- BASES DE LA NUTRITION DES SAUMONS

Le poste alimentation représente jusqu'à 60% des coûts d'élevage des saumons. L'efficacité économique des fermes aquacoles est donc conditionnée par une bonne adéquation entre les quantités d'aliment distribuées et ingérées. Si la quantité distribuée est supérieure à la demande, cela correspond à une perte économique. Si la quantité distribuée ne couvre pas les besoins, la croissance des poissons est limitée et la taille des poissons est plus hétérogène.

Les besoins alimentaires sont variables au cours du temps, ce qui implique une perpétuelle adaptation de la quantité et du type d'aliment distribué. La figure 6 (d'après Pennell (1996)) représente les types de croissance exprimés soit en poids total (1), soit en taux de croissance absolu (2) ou en taux de croissance relatif (3).

Figure 6 : représentation des cycles de croissance en fonction des variables suivies (d'après Pennell, (1996))



Dans cette partie, nous aborderons l'anatomie du tube digestif des saumons avant d'en étudier le fonctionnement. Les mécanismes du déclenchement de la prise alimentaire, la régulation de l'ingestion en fonction de différents facteurs nutritionnels, environnementaux et comportementaux, puis la digestion et son efficacité seront présentés successivement.

A. Anatomie et physiologie du tube digestif

a) Morphologie du tube digestif des saumons

L'appareil digestif des poissons présente des caractéristiques constantes :

- l'œsophage a toujours une musculature striée, permettant à l'animal une régurgitation tardive,
- l'intestin n'a pas de colon véritable,
- la paroi de l'intestin ne comprend que trois tuniques : une muqueuse, une musculuse et une séreuse,
- les villosités de l'intestin sont peu développées,
- certains entérocytes gardent, pendant toute la vie du poisson, une fonction d'endocytose (à l'inverse des mammifères où cette capacité n'existe que chez les nouveaux nés).

La **bouche** assure à la fois l'aspiration de l'eau pour la respiration et l'ingestion des aliments. Elle ne contient pas de glandes salivaires mais des papilles gustatives. Des cellules chémoréceptrices sont situées à l'extérieur de la bouche, sur les barbilles, et permettent la localisation des aliments et le repérage des attractants. Les papilles gustatives servent à tester l'aliment ingéré et à renforcer ou inhiber l'ingestion. La cavité orale est constituée de nombreuses glandes sécrétrices de mucus, mais ne présente pas de glandes salivaires. La couche épidermique est très fournie en terminaisons nerveuses. Les papilles gustatives se trouvent dans l'épiderme de la bouche, des lèvres, des barbilles, du pharynx et des arcs branchiaux. Les papilles sont composées d'un récepteur, de cellules de soutien et basales organisées comme des quartiers d'orange et possèdent de courts processus filamenteux orientés vers l'eau (d'après Brown, (1999)).

La muqueuse de l'**œsophage** contient de nombreuses cellules à mucus. La présence de fibres striées à contraction volontaire permet au poisson de régurgiter les aliments si leur taille ou leur goût ne lui conviennent pas.

L'aliment ingéré par le poisson se retrouve dans l'estomac. L'**estomac** apparaît au moment de la métamorphose. L'épithélium est de type endodermique, et l'on y distingue de nombreuses glandes en doigt de gant garnies de cellules sécrétrices de proenzymes digestives et d'acide chlorhydrique. D'autres types de cellules sécrètent des hormones ou du mucus. Le pH est généralement situé autour de 2-3 mais peut monter à 5 dans le cas des poissons d'eau de mer qui boivent sans cesse une eau à pH 8. Le temps de séjour des aliments varie en fonction de la température de l'eau, du degré de remplissage de l'estomac, de la taille du poisson (le temps de séjour est plus court pour un petit poisson, 1 h vs 10 h).

L'**intestin** des poissons est peu différencié sur le plan morphologique, la différenciation se fait sur le plan fonctionnel avec, en fonction des zones, la digestion des protéines, des lipides ou des glucides. La **partie proximale** porte des diverticules aveugles : les caeca, dont le nombre est variable en fonction de l'espèce et de la lignée, ainsi que de la température de l'eau au cours du développement. Les salmonidés en comptent au moins 70. Les entérocytes se multiplient dans des zones équivalentes à des cryptes, se différencient en migrant le long des pseudovillosités en cellules à mucus ou en cellules absorbantes puis dégèrent au sommet où elles desquament.

La surface des entérocytes est recouverte de microvillosités qui sont parcourues par des microfilaments de nature polysaccharidique qui se prolongent dans la lumière du tube digestif et forment un réseau filtrant : le glycocalyx. Des enzymes comme des lipases et des lactases, des protéines transporteuses et des canaux ioniques sont enchâssées dans la membrane des entérocytes. Dans les cellules de l'intestin proximal, on observe après le repas d'abondantes formations lipidiques : les lipides particulaires et les lipides étalés (cf. partie sur les lipides).

Comme nous l'avons évoqué au début de cette partie, les entérocytes des poissons ont la spécificité d'être pourvus d'invaginations nombreuses à la base des micro villosités et de vacuoles dans le cytoplasme. Ces structures reflètent le rôle de l'endocytose dans l'absorption de 1 à 6% des protéines alimentaires. Lors de l'endocytose, une partie des molécules atteint la *lamina propria* et peut ainsi exercer une activité antigénique. Ceci peut être mis à profit pour la vaccination par voie orale mais peut également avoir un effet néfaste car à l'origine de nombreuses réactions immunitaires de type allergique.

L'**intestin distal** est court chez les poissons carnivores. Ses entérocytes n'ont que des microvillosités courtes : il est impliqué dans l'osmorégulation et l'absorption des lipides.

Le foie des poissons constitue un organe de réserve de lipides. Le foie produit la bile qui, comme chez les mammifères, contient des sels biliaires émulsifiant les graisses et des pigments tels que la bilirubine et la biliverdine. La couleur de la bile est jaune verdâtre. Les sels biliaires émulsifient les graisses et aident à ajuster le pH intestinal pour la digestion. La bile est collectée via un réseau de canalicules intracellulaires qui s'anastomosent pour former des canaux biliaires. Ces canaux fusionnent pour former une vésicule biliaire dont les produits sont émis par le canal biliaire en région pylorique. Le pancréas n'est pas individualisé, mais des cellules digestives et endocrines (sécrétant l'insuline) sont réparties autour du duodénum. Les sécrétions enzymatiques se déversent néanmoins dans le canal cholédoque.

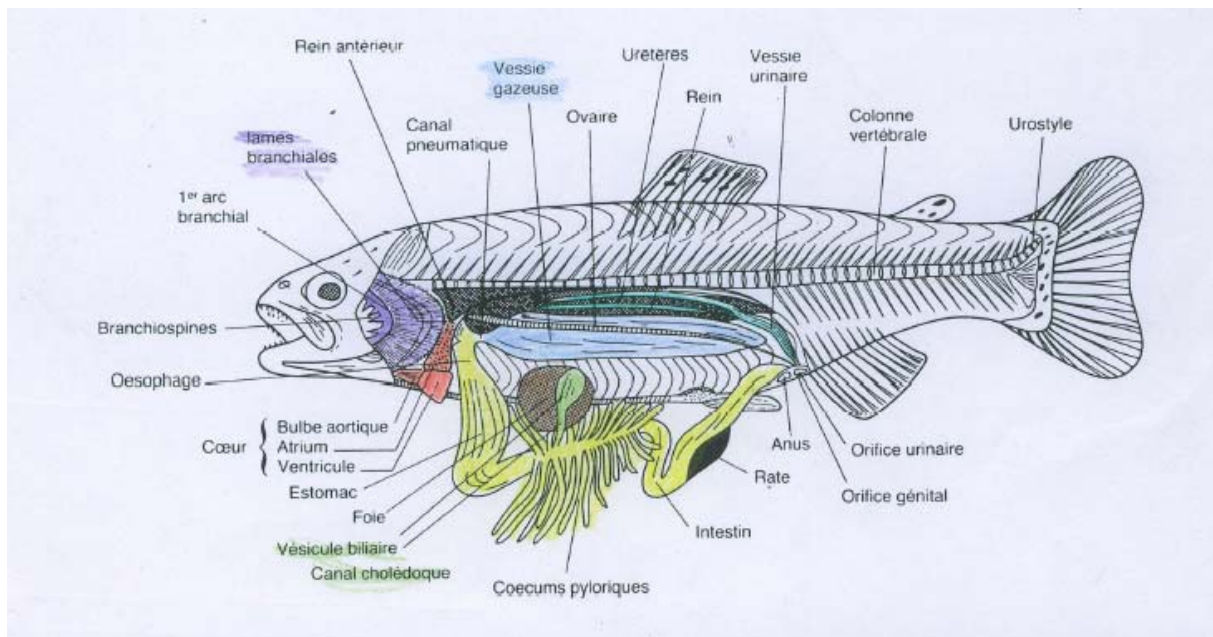


Figure 7. Schéma de l'organisation interne d'un poisson carnivore, la truite arc-en-ciel (*Salmo Sabheri*) (dessin M. Dorson)

Dans les parois du tube digestif se trouvent également des lymphocytes et des cellules endocrines sécrétant de la cholécystokinine (CCK), de la gastrine et du glucagon. Ces hormones, peu connues chez les poissons, participent à la sécrétion des grains de zymogène et de la bile. La gastrine est sécrétée dans l'estomac et stimule le relargage d'acide chlorhydrique (Brown (1999)).

La majorité des **enzymes digestives sont apportées sous forme de grains de zymogènes** dans l'estomac et le pancréas. Ce sont des proenzymes activées par hydrolyse du peptide masquant le site actif. On peut citer, par exemple, la trypsine, la chymotrypsine, la collagénase, la chitinase ou les carboxypeptidases. L'amylase et la lipase pancréatiques sont sécrétées directement sous forme active. La lipase des poissons présente une affinité équivalente pour les différents acides gras de la molécule de triacylglycérol (triglycéride), contrairement à celle des vertébrés supérieurs qui est surtout active sur les acides gras en positions externes.

La température optimale d'activité de ces enzymes se situe entre 30 et 40°C, bien que certaines soient particulièrement actives à basse température telles que l'amylase (dès 15°C) et la pepsine (dès 20°C).

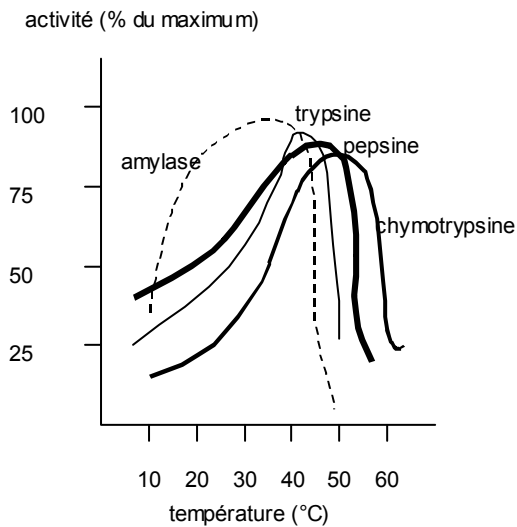


Figure 8: températures optimales d'action de différentes enzymes stomacales et pancréatiques chez les poissons (d'après UYS et Hecht. (1987), cité dans Guillaume *et al* (1999)).

Les principales **enzymes membranaires** des cellules intestinales de la bordure en brosse hydrolysent les fragments restant de la première hydrolyse (peptides, disaccharides..) toujours à proximité des sites d'absorption. On peut citer par exemple la γ -glutamyl transférase, les phosphatases acide et alcaline, la maltase, la succinate déshydrogénase, la leucine aminopeptidase... La succinate déshydrogénase est une enzyme mitochondriale. La phosphatase alcaline est l'enzyme de référence des cellules de la bordure en brosse. En dehors de la lactase, les autres enzymes sont des enzymes de la membrane de la bordure en brosse impliquées dans l'absorption des nutriments (d'après Krogdahl (2004)).

D'autres enzymes ont des origines différentes : l'aminopeptidase provient de lysosomes pancréatiques, d'autres sont endocellulaires, d'autres enfin sont d'origine bactérienne, apportées par la flore intestinale. Bien que la plupart des enzymes soient communes avec les vertébrés supérieurs, le fonctionnement et l'importance relative de chaque enzyme est différente. Chez les poissons, l'activité protéolytique est toujours très élevée. L'activité lipolytique est également très élevée chez le saumon atlantique. L'activité amylolytique est plus réduite.

La digestibilité des principaux nutriments est, avec les aliments usuels :

- CUD protéines supérieur à 90%.
- CUD lipides supérieur à 95% pour les lipides à bas point de fusion et de 30 à 70% pour les lipides à haut point de fusion.
- CUD glucides de 100% pour les sucres simples. Le CUD de l'amidon est très faible pour les poissons carnivores. Elle varie en fonction de la quantité d'amidon dans la ration et de la forme de cet amidon (cf. partie II- F).

L'absorption des nutriments est réalisée par endocytose, par diffusion simple ou par transport actif. L'absorption par diffusion simple fonctionne grâce au gradient de concentration de part d'autre d'une membrane, c'est le cas pour les produits de dégradation des lipides. L'absorption par diffusion facilitée et par transport actif se réalise grâce à des molécules protéiques enchâssées dans la membrane. C'est le cas pour le transport du glucose ou des acides aminés qui sont transportés par des pompes sodium dépendantes.

Le tube digestif post-gastrique des salmonidés, contrairement aux mammifères et aux oiseaux, est capable d'absorber des nutriments sur toute sa longueur. La plus forte concentration de transporteurs se trouve dans la région des caeca pyloriques où 70 à 80% des molécules sont absorbées (d'après Nordrum (2000)). La figure 9 représente les taux d'absorption de nutriments en pmol/mg/min de six acides aminés dans les différents segments de l'intestin : (diamants, premier point) caeca pyloriques/intestin proximal, (triangles, deuxième point) intestin médian et (cercles, troisième point) intestin distal. Cette figure met en exergue le gradient décroissant d'absorption des régions proximales aux régions distales.

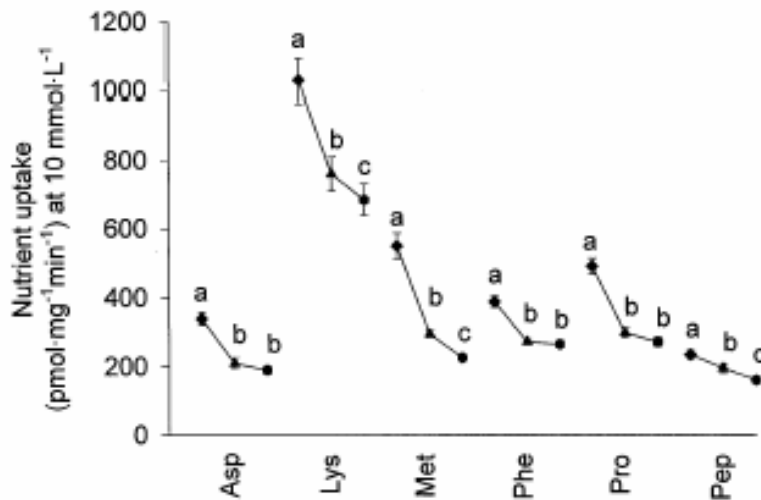


Figure 9: d'après Nordrum *et al.*, (2000). Gradient proximal à distal des taux d'absorption (pmol/mg/min) mesurés dans les différentes régions intestinales à 10 mmol/l d'acides aminés et dipeptides. Les valeurs sont combinées pour tous les groupes et sont des moyennes. Des lettres différentes témoignent de différences significatives entre régions ($P < 0,05$).

L'absorption des lipides se réalise après la formation de micelles d'acides gras, de monoacylglycérols, de phospholipides, de cholestérol et/ou d'acides biliaires. Dans les entérocytes, on trouve les « lipides étalés ». Ils correspondent à une forme de stockage spécifique aux poissons, et d'aspect microscopique particulier. Pour leur part, les oligo-éléments se fixent en général préalablement sur un acide aminé qui sert de ligand.

D'un point de vue dynamique (d'après Sveier,(1999)), l'estomac des saumons est majoritairement vidé en 6 à 24h après un repas. Le segment suivant est le caeca pylorique. L'activité motrice de cette dernière portion démarre 3 h après le repas et atteint son maximum 12h après le repas. L'intestin moyen commence à se remplir 3 h après le repas. Son volume maximal est atteint 12h après le repas. Le temps de transit dans les caeca pyloriques est donc très court. Le remplissage de l'intestin postérieur débute 6h après le repas. Le temps moyen de résidence dans l'intestin moyen, portion la plus longue du tube digestif, est par conséquent de 3h.

La taille des particules a un effet significatif sur l'évacuation gastrique : 12 h après le repas, l'estomac contient plus de fractions alimentaires si l'aliment est composé de grains grossiers. Le temps nécessaire à la digestion d'un repas varie en fonction des propriétés physiques et chimiques du repas grâce à un signal rétroactif envoyé par des récepteurs du duodénum à la musculature de l'estomac. Le temps nécessaire à la vidange totale de l'estomac est de 10h pour la micro farine, 12h pour la farine standard et 14h pour la farine grossière.

Le taux de croissance est supérieur lorsque les farines sont moulues de manière standard (*vs* grossière et micronisée). Lorsque la taille des particules est réduite, le taux de croissance et le taux de conversion de l'aliment sont altérés.

Un délai important nécessaire à la dégradation d'un seul repas dans le tube digestif génère un flux d'acides aminés plus en harmonie avec la capacité de synthèse protéique. Une farine finement moulue est rapidement digérée, les acides aminés sont vite libérés. Cet afflux important sera compensé par un taux supérieur de désamination dans le foie. Une plus grande partie des protéines apportées par l'aliment sera utilisée comme source d'énergie, au lieu d'être source de croissance protéique. Dans tout le tube digestif, l'évacuation est donc ralentie quand la taille des particules augmente. La quantité ingérée ne modifie pas le temps de vidange (d'après Sveier,(1999)).

b) Modalités et efficacité de la digestion

L'efficacité de la digestion résulte des processus cumulés de sécrétion des enzymes, d'absorption et de la vitesse du transit. Une chute de la température diminue l'activité des enzymes et la vitesse des processus d'absorption, ralentit le transit et diminue l'ingestion, ce qui, au bout du compte, n'affecte pratiquement pas le bilan de la digestion. Lors de transfert en eaux douces, le transit est accéléré, ce qui diminue temporairement la digestibilité moyenne des aliments distribués (Guillaume *et al.*,(1999)).

La **sélectivité de l'absorption** des nutriments est différente en fonction du segment digestif (d'après Denstadli (2004)). L'intestin, habituellement séparé en trois morceaux peut être divisé en 5 portions: l'intestin proximal est divisé en caeca pylorique antérieur, médian et distal et débouche sur l'intestin médial et distal. La spécificité de chaque segment est résumée dans le tableau 3. Il montre la spécificité d'absorption des acides gras et des lipides et la spécificité pour les autres molécules. Les acides gras à courte et moyenne chaîne (moins de 10 atomes de carbone) sont absorbés précocement, au niveau des caeca pyloriques antérieurs. La majorité des acides gras sont absorbés dans la portion des caeca pyloriques médians, 12 à 18 h après le repas.

Tableau 3 Résumé des principales caractéristiques de chaque zone intestinale en ce qui concerne l'absorption des nutriments. (D'après Denstadli V., (2004)).

Portion intestinale	Spécificité d'absorption des acides gras	Spécificité d'absorption des autres molécules
Caeca pylorique antérieur	Absorption des ag moyenne chaîne C10 :0	Site d'absorption du glucose, des acides aminés et des dipeptides. 87% de la longueur et 64% de la masse intestinales.
Caeca pylorique médian	Plus hauts niveaux (12 et 18h)	
Caeca pylorique distal		
Intestin médian	AG à longue chaîne	
Intestin distal	Niveaux négligeables	Site majeur d'absorption des molécules protéiques intactes

La **valeur nutritive d'un aliment** dépend de son contenu en nutriments et de la capacité de l'animal à les digérer et à les absorber. On quantifie la digestibilité à l'aide du coefficient d'utilisation digestive ou CUD. La digestibilité est généralement de nature additive (Guillaume *et al* (1999)), on peut prédire la digestibilité des nutriments d'un aliment à partir des valeurs de la digestibilité des matières premières qui le composent. Cette règle n'est pas valable pour l'amidon qui, en excès (> 10%), altère la digestibilité des protéines, ni lorsque les quantités ingérées sont élevés ce qui sature les capacités digestives du poisson.

Une légère restriction alimentaire permet une meilleure utilisation des aliments, les CUD sont, en particulier, légèrement améliorés.

De plus d'autres facteurs peuvent modifier les **coefficients d'utilisation digestive** : la flore digestive, la température et la salinité de l'eau. Malgré l'influence de ces facteurs, les mécanismes de régulation permettent au poisson de maintenir un bilan digestif presque constant, avec en particulier une très haute digestibilité des protéines.

Tableau 4 : Synthèse des coefficients d'utilisation digestive et de leurs facteurs de variation en fonction du type de nutriment concerné (d'après Penell *et al.*, (1996)).

Nutriments	CUD et facteurs de variation
Protéines	CUD > 90% Presque indépendante du niveau d'ingestion et de la température, et de la teneur en lipides de l'aliment Les protéines d'origine animale sont plus digestibles que les protéines d'origine végétale. La cuisson du soja détruit une partie des facteurs anti-nutritionnels et entraîne une amélioration du CUD qui passe de 70 à 85%.
Lipides	Les lipides à bas point de fusion sont bien utilisés par les poissons (CUD>95%). Ils doivent être protégés des phénomènes d'oxydation. Leur digestibilité diminue quand la longueur de chaîne s'accroît et quand le degré d'insaturation diminue. En effet, l'état solide rend l'émulsification des lipides plus difficile.
Glucides	La digestibilité des sucres simples est proche de 100%. La digestibilité de l'amidon est nettement inférieure et dépend de la température de l'eau, de la nature et de la taille de l'amidon et de l'intégrité du grain d'amidon. Tout traitement thermique ou hydrothermique altérant la structure du grain augmente le CUD de l'amidon (de 25% pour l'amidon cru à 80% au maximum, selon l'espèce): c'est le rôle bénéfique de la gélatinisation.

Les fèces sont composés d'une partie non dégradée des aliments et de déchets métaboliques. La quantité de rejets digestifs solides varie en fonction des différentes matières premières utilisées dans l'élaboration de l'aliment composé, mais également en fonction des proportions de chaque nutriment (protéines, lipides et glucides). Ils contiennent en moyenne 80 à 85% d'eau. La fraction non digérée contient 10 à 15% de protéines, moins de 1% de lipides, 15 à 20% de minéraux, d'hydrates de carbone et de fibres. L'émission des fèces est plus importante la nuit.

On peut collecter les fèces par cinq méthodes :

- par pression abdominale qui consiste à appliquer une pression sur l'abdomen de poissons préalablement tranquilisés pour faire sortir les fèces. Les échantillons sont cependant souvent souillés par de l'urine.
- par succion anale ou aspiration sous vide des fèces.
- par dissection qui oblige à sacrifier des poissons
- par siphonnage des fèces qui est la technique de référence. Elle occasionne beaucoup de délitement et de dissolution. Les fèces sont également soumis à action bactérienne et se chargent en sels issus du milieu marin.
- par filtration en continu de l'eau.

B. Comportement alimentaire et régulation de l'ingestion

a) Régulation physiologique de l'ingestion

Les mécanismes de régulation de l'ingestion volontaire sont les mêmes que ceux des vertébrés homéothermes, avec :

- un contrôle central par l'hypothalamus qui stimule ou inhibe la prise alimentaire
- un contrôle périphérique via des signaux humoraux émis par le tube digestif ou le cerveau (peptides tels que la cholécystokinine, la bombésine, la somatostatine)

D'un point de vue pratique, l'ingestion volontaire peut être mesurée de trois façons :

- Par distribution manuelle ou mécanisée et suivi visuel de l'ingestion volontaire apparente (*ie.* distribution jusqu'à satiété évaluée par l'arrêt d'ingestion d'aliment par les saumons). On mesure par la suite la quantité d'aliment distribuée et, si un dispositif de récupération est présent, la quantité d'aliment non consommée récupérée au fond du bassin.
- Par distribution d'aliment radiomarké puis mesure de la radioactivité des filets et divers organes des saumons en fonction de la quantité d'aliment distribuée.
- Grâce à des distributeurs automatiques constitués de systèmes déclenchés par les poissons (poussoirs) délivrant une quantité connue de granulés à la suite d'une activation. La mesure consiste en l'enregistrement du nombre de demandes faites par les poissons, et de la quantité distribuée.

b) Facteurs agissant sur l'ingéré volontaire :

❖ nutritionnels

Les poissons sont capables de distinguer des aliments différents, de même qu'ils semblent capables de discerner les aliments carencés ou non en un nutriment essentiel. On peut citer à titre d'exemple la capacité de différencier des aliments avec des teneurs en zinc, en méthionine différentes, et de discerner un aliment à base de farine de poisson d'un aliment à base de caséine. Lorsque les poissons n'ont pas le choix de l'aliment, ils compensent partiellement une déficience par une augmentation de l'ingéré volontaire ou par un refus de s'alimenter. La présence d'attractants peut modifier le comportement alimentaire des saumons : des poissons manquant d'appétit peuvent se remettre à manger après addition d'inosine. De même, des aliments riches en farines de crevettes stimulent la prise alimentaire.

Si les poissons consomment un aliment équilibré, **la quantité d'aliment ingérée est régulée en fonction des besoins énergétiques**, sur la base de leur teneur en énergie digestible. Cette régulation dépend de la source d'énergie disponible. L'étude de Sveier *et al* (2000) a comparé l'effet de 3 teneurs en protéines de l'aliment (300, 350 et 450 g/kg d'aliment) sur la croissance. La teneur en énergie était fixée entre 22 et 23 MJ/ kg d'aliment. Pour des raisons technologiques, la teneur en glucides était d'autant plus élevée que le taux de protéines dans l'aliment était faible. En effet, maintenir constante la teneur en énergie de l'aliment, sans modifier le taux d'incorporation de l'huile de poisson, implique d'utiliser des glucides en tant que liant et source d'énergie. Le rapport protéines / glucides de chaque aliment était donc différent :

- entre 0,96 et 1,16 pour les aliments à 30% de protéines
- entre 1,63 et 2,21 pour les aliments à 35% de protéines

- entre 4,16 et 4,26 pour les aliments à 45% de protéines

Les saumons de 300 à 700 g nourris avec un aliment contenant 30% de protéines présentent une croissance inférieure à celle de saumons nourris avec des teneurs en protéines supérieures. Des teneurs en protéines au moins égales à 35% sont suffisantes pour supporter une forte croissance. Le taux d'utilisation (mesuré par le FCR*) d'un aliment diminue quand le niveau d'énergie augmente, mais la diminution du FCR ne parvient pas à combler l'excès d'énergie apportée lorsque les aliments sont très riches : la rétention nette d'énergie est donc plus élevée. Le taux d'utilisation d'un aliment est maximal quand cet aliment contient peu d'énergie, une teneur en protéines suffisante pour permettre la croissance et sans excès afin de maximiser l'effet d'épargne des protéines par les glucides (Sveier (2000)).

Après une période de privation permettant une parfaite vidange gastrique (6 à 24 heures en fonction de la température (Sveier (1999))), le premier repas pris correspond à la capacité volumique de l'estomac : c'est la phase d'hyperphagie compensatrice. Des récepteurs nerveux, sensibles à la pression du contenu sur la paroi de l'estomac, apportent la sensation de satiété. Après 2 à 3 repas la régulation de l'ingéré se base à nouveau sur l'énergie digestible.

Ainsi, nous avons vu que l'ingéré volontaire est soumis à plusieurs facteurs de variation :

- **le choix d'un aliment avec ses propriétés intrinsèques, tant sur le plan de l'équilibre alimentaire que sur le plan de la qualité organoleptique,**
- **la consommation d'une certaine quantité de cet aliment de façon à couvrir les besoins du poisson en énergie, en nutriments,**
- les limites physiologiques à l'ingestion de la quantité nécessaire d'aliment, avec en particulier le volume de l'estomac et le temps de vidange gastrique.

❖ Environnementaux

La **température** agit sur l'ingestion volontaire et sur l'intervalle séparant les prises d'aliment. Il existe un optimum thermique en dehors duquel l'ingestion volontaire est réduite. L'intervalle entre les prises alimentaires est étroitement corrélé au temps nécessaire à la vidange gastrique.

Les saumons sont particulièrement sensibles à la saison. Un apport plus élevé en protéines permet de « booster » la croissance musculaire, surtout en été. Comme les muscles des poissons sont très riches en protéines, le facteur limitant est la quantité d'acides aminés essentiels disponibles. En hiver, la croissance ralentit. La diminution de la photopériode limite la consommation alimentaire. Il faut des aliments riches en énergie pour maintenir la teneur en matières grasses du poisson et éviter la fonte musculaire. Usuellement, les aliments d'hiver contiennent des teneurs en huile supérieures à 33%.

La **photopériode** semble également influencer la prise alimentaire. Les saumons s'alimentent lorsqu'ils sont actifs or, l'activité alimentaire est ajustée au **nyctémère**. La figure 10 met en évidence deux pics d'activité des saumons au lever et au coucher du soleil. Ces deux pics correspondent aux moments privilégiés de prise des repas. Au cas où la nourriture serait plutôt disponible à d'autres moments de la journée, l'activité des saumons se calque sur l'abondance des proies.

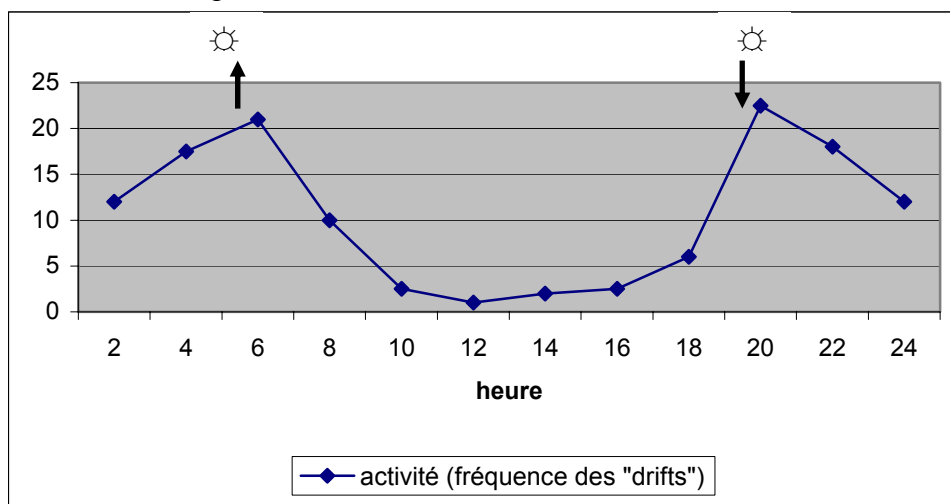


Figure 10 : issu de Eriksson and Alanara (1997) cité dans Pennell (1996) : représentation de la distribution des activités de jeunes tacons dans une rivière du nord de la Suède, à la mi mars.

De plus, une durée d'éclaircissement croissante stimule la prise alimentaire. Les poissons diurnes ont souvent une phase d'hyperphagie lors des premières heures du jour et occasionnellement un second pic qui précède le crépuscule. L'activité alimentaire des saumons est majoritairement diurne mais devient nocturne lorsque la température s'abaisse en dessous de 10°C.

D'autres variations semblent liées aux cycles lunaires : la croissance et les cycles d'appétit sont corrélées à un cycle semi lunaire (Eriksson and Alanara (1997) cité dans Pennell (1996)).

La **qualité de l'eau** est très importante sur le bien être des poissons. L'élévation de la teneur en ammoniacale et/ou la diminution de la teneur en oxygène dissous sont des facteurs qui diminuent voire inhibent la consommation d'aliment. L'osmorégulation est une activité stressante pour le poisson et consomme beaucoup d'énergie. Si trop de protéines sont apportées par l'alimentation, on risque d'induire un stress osmotique. En effet, les protéines

sont riches en azote. Or, comme nous l'avons vu précédemment (partie I B), les déchets azotés sont éliminés sous forme d'ammoniac par les reins et les branchies. Dans les branchies, l'ammoniac ionisé (NH_4^+) est éliminé par transport un ion sodium (Na^+). Or, en eau de mer, les saumons sont dans un milieu très riche en minéraux, ils doivent donc « boire » et absorber de l'eau en permanence et éliminer activement les ions (surtout Na^+ et Cl^-). Un excès d'azote accentue donc l'entrée de Na^+ et met le poisson en situation de déséquilibre osmotique.

La teneur en certains oligo-éléments peut également avoir une influence. Comme montré dans le tableau 5, l'aluminium peut avoir un effet sur l'apparition de lésions branchiales (Selon Fivelstad *et al* (2003)).

Tableau 5 Principes de l'expérimentation et résultats d'une étude sur les effets de la teneur en dioxyde de carbone et en aluminium dans l'eau sur les paramètres respiratoires et de croissance de smolts de 80 g (d'après Fivelstad *et al* (2003)). L'élévation du niveau de CO₂, la diminution du pH et les modifications chimiques de l'aluminium ont des effets néfastes sur les saumons même à de basses concentrations.

Conditions expérimentales	paramètres	Témoin (●)	Moyen (■)	Haut (▲)
	CO ₂ (mm Hg)	0.5	2.7	5.7
	CO ₂ (mg/l)	1,8	9,3	19,4
	pH	6,6	6,0	5,7
Concentration Aluminium (µg/l)	115 - 140			
résultats	Quantité de dépôt al branchies	1	5	7
	Fréquence respiratoire	<p>La fréquence respiratoire est augmentée lorsque la teneur en CO₂ de l'eau augmente.</p>		
	Lésions branchiales		Hypertrophie focale à diffuse Hyperplasie cellules à chlorure Adhésion des lamelles	
	Taux de croissance (SGR)	0,26%/j	0,06%/j	-0,25%/j
	Mortalité cumulée	0,4%	4%	> 42%
Cortisol plasmatique (µg/100ml)	5	5	17	

L'aluminium devient toxique à partir d'un pH de 6,8 car une forme ionisée est créée : Al(OH)₄⁻. Il est aussi toxique en deçà de 6,2 (toxicité maximale à un pH de 5). Dans les smolteries, le pH devrait être maintenu entre 6,5 et 6,8 en portant attention aux changements diurnes de consommation d'O₂ et d'excrétion de CO₂ qui font modifier le pH). Le dépôt d'aluminium est pH dépendant, et l'aluminium chargé se lie fortement à des éléments structuraux à la surface des branchies et à de l'acide sialique (chargé négativement) dans le mucus des branchies.

La figure 11 permet de déterminer les valeurs de sécurité pour les poissons en fonction de la relation entre la teneur en CO₂ et la toxicité de l'aluminium.

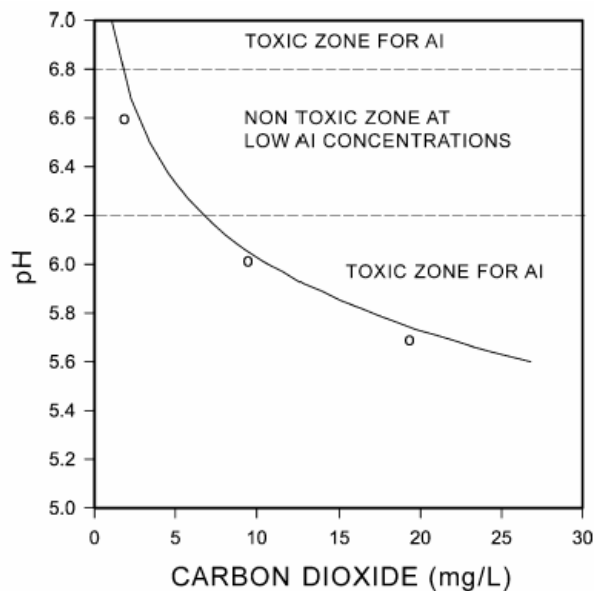


Figure 11, Modélisation de la relation théorique entre la teneur en dioxyde de carbone et le pH dans l'eau sortant d'un tank où l'eau entre à un pH de 7 et à 8°C. Les lignes en pointillés délimitent l'intervalle de sécurité pour le pH et la teneur en CO₂. (d'après Fivelstad *et al* (2003)),

La **gestion des sites d'élevage** joue un rôle considérable sur la qualité des productions concernées (Wheatley (1995)). La mortalité est supérieure quand les sites ne sont pas soumis à vide sanitaire, quand il y a plus d'une génération sur le même site, quand l'abattage des poissons a lieu à la ferme, et quand le personnel de la ferme se déplace entre plusieurs sites. Une grosse partie de la mortalité se produit au moment des transferts en mer ou entre sites. Les maladies sont également des causes de mortalité. L'intensité et la répartition des taux de mortalité au sein d'un élevage sont différents en fonction de l'agent infectieux. Pour la pancréatite (NPI), tout un élevage a des taux de mortalité comparables. Pour la vibriose, une cage peut être affectée et pas les autres.

Le vide sanitaire permet de limiter l'impact sur l'environnement, de restaurer un équilibre des fonds marins. Ainsi, il permet le rétablissement de teneurs en oxygène, d'éviter le dégagement d'hydroxyde de soufre (H₂S), de limiter la multiplication d'hôtes tels que le plancton (qui est le vecteur potentiel d'agents pathogènes tels que des micro-organismes et des poux de mer), et de diminuer la charge parasitaire.

❖ Comportementaux

Lors d'un **stress aigu**, la prise alimentaire est brutalement stoppée. La prise alimentaire reprend ensuite après une courte phase d'hyperphagie compensatrice qui annule ou diminue l'effet négatif du stress sur la croissance. Les **stress chroniques** altèrent l'ingestion d'aliment mais également les performances de croissance des saumons. La densité* de population au sein d'un bassin, qu'elle soit trop forte (> 30 kg/m³, d'après Larsen, société Salmar (Comm. Orale)) ou trop faible, est responsable de stress chroniques.

L'ingestion est l'achèvement d'une séquence stéréotypée qui commence par la détection d'une source potentielle de nourriture, qui se continue par l'orientation, l'approche et la capture, puis par l'avalément de la proie. Cette séquence peut cependant se terminer à tout instant avant l'avalément. Un poisson peut s'approcher de sa proie puis la laisser, ou capturer quelque chose puis le rejeter. Les attributs physiques d'une proie n'ont pas seulement un rôle sur la capacité du saumon à l'attraper, mais également sur la stimulation du poisson à la consommer.

La forme des granulés est essentielle. Chez les juvéniles, certaines formes de granulés sont moins attirantes que les proies sauvages. La probabilité d'ingestion par les juvéniles varie en fonction de la taille et de la forme des proies, qui sont essentielles à tous les âges. Elles influencent la détectabilité, l'attractivité, la facilité de capture et d'ingestion. D'après l'expérience de Smith *et al.*, (1995), les juvéniles grandissent plus vite lorsqu'ils reçoivent des granulés de longueur équivalente à 2,2 à 2,6% de la longueur moyenne des poissons. Cette tendance concorde avec les observations comportementales d'attrait des poissons pour les proies de taille correspondante. La figure 12, met en parallèle le temps de réponse de juvéniles de 3,4 kg face à des granulés de 6, 13 et 20 mm de long et 5, 6, 8 et 10 mm de diamètre. Le temps de réponse le plus court est observé pour les granulés de 8 mm de diamètre et 13 mm de long.

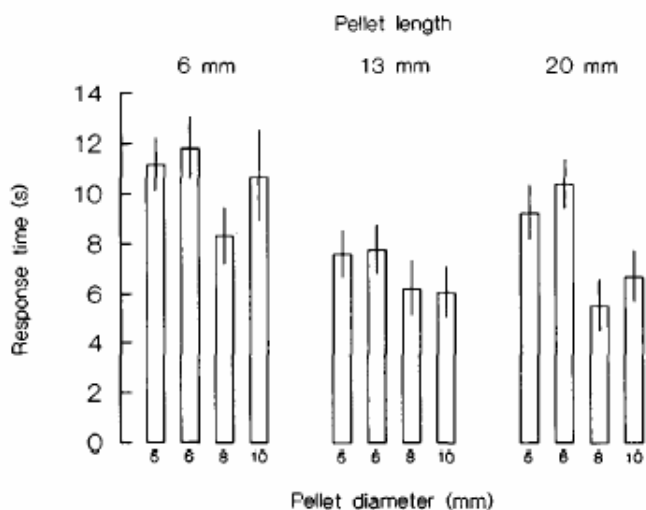


Figure 12 : Temps de réponse moyen de saumons Atlantique à des granulés cylindriques de longueur et diamètres différents. Les barres d'erreur traduisent les intervalles de confiance. D'après Smith *et al.*, (1995).

Le diamètre et la longueur des granulés ont modifié tous deux le temps avant capture mais seule la variation de longueur a un effet significatif sur le taux d'ingestion. Les granulés les plus petits (1,7% de la longueur des poissons vs 2,2% et 2,6%) ont été attrapés le plus tard. **Une certaine hétérogénéité de la taille des granulés est intéressante pour s'adapter aux variations de la taille des saumons au sein d'un bassin** afin d'éviter de dégrader encore plus la vitesse de croissance des poissons les plus petits. **La texture des granulés entre également en compte :** les granulés tendres sont mieux acceptés des juvéniles que les granulés durs, car les juvéniles peuvent plus facilement maintenir des granulés lorsqu'ils sont mous.

C. Nutrition énergétique

Dans les conditions aérobies, l'énergie est apportée par l'oxydation des composés organiques provenant de la nutrition et des remaniements tissulaires. Les substrats élémentaires issus de la dégradation des nutriments sont, soit incorporés dans des tissus, soit catabolisés pour produire de la chaleur et de l'ATP.

Dans les cellules aérobies, la production d'énergie passe par les étapes suivantes :

- formation d'acétyl-coenzyme A par oxydation du pyruvate, des acides aminés ou oxydation des acides gras.
- cycle de Krebs libérant du CO₂. Chez les poissons, le cycle de Krebs utilise peu de glucose mais permet l'utilisation d'acides aminés à de nombreuses étapes du cycle. Les acides aminés sont les principaux pourvoyeurs d'énergie chez les poissons, mais lorsque le régime alimentaire contient des teneurs élevées de lipides, on observe une diminution de l'oxydation des acides aminés : c'est **l'effet d'épargne**.

- Les deux réactions précédentes s'achèvent par le transport des électrons de l'hydrogène vers l'oxygène moléculaire et la phosphorylation de l'ADP en ATP.

Chez les saumons, la synthèse des lipides a lieu essentiellement dans le foie alors que leur dégradation se produit dans tous les tissus utilisateurs. Chez les mammifères, l'acétyl-CoA issu de la **β-oxydation** des acides gras peut conduire à la formation de corps cétoniques lorsque les capacités d'entrée dans le cycle de Krebs sont saturées ou lors d'un défaut en oxaloacétate. Chez les poissons, un cycle futile (pertes énergétiques) permet le maintien du niveau de corps cétoniques. La β-oxydation est la voie métabolique majeure de l'oxydation des acides gras pour produire de l'énergie. Les substrats préférés de la β oxydation des mitochondries musculaires sont l'acide palmitoléique (C16:1, n-7) ; l'acide gadoléique (C20:1) et l'acide érucique (C22: 1). Les acides gras mono-insaturés sont donc les substrats préférés de cette voie. C'est pourquoi, par rapport aux apports alimentaires, on ne retrouve qu'une petite proportion de ces acides gras dans les cellules car ils sont consommés. Le catabolisme de ces acides gras est le moins complexe, le plus performant. Un aliment sera plus efficace s'il est riche en AGMI.

La **glycolyse** ne représente que 2% des voies métaboliques de production d'énergie, elle correspond à la combustion complète du glucose. La plupart des réactions glycolytiques sont réversibles, sauf celles impliquant l'hexokinase et la pyruvate kinase. Ces enzymes étant peu actives chez les salmonidés, les étapes où elles interviennent sont limitantes. Dans le foie, la glycolyse sert davantage à fournir des précurseurs pour la synthèse de molécules variées. Le **cycle des pentoses** est également fonctionnel chez les poissons.

Au sein du **cycle de Krebs**, le flux carboné est régulé par les rapports NADH/NAD⁺ et ADP/ATP. Ces différentes molécules modulent l'action des enzymes cataboliques. La charge énergétique de la cellule correspond donc à l'équilibre entre ces différentes formes.

Les pertes métaboliques d'énergie sont, pour un ingéré azoté donné, réduites lorsque le rapport Protéines Digestibles / Energie Digestible de l'aliment passe de 23 à 18 mg/kJ. L'excrétion azotée diminue quand la proportion d'énergie apportée sous forme non azotée augmente (« effet d'épargne » des protéines). Les besoins des salmonidés sont entre 17 et 25 g de protéines / MJ d'énergie digestible (25 pour les juvéniles, 17 en finition (d'après Wilson (1992))). Le ratio optimal pour des saumons entre 1 et 3kg est de 19 g/MJ (D'après Refstie *et al* (2000)).

Les **besoins énergétiques** des saumons à jeun sont nettement plus faibles que ceux des mammifères, en raison de l'ectothermie, de l'ammonotélie et de la flottaison :

- L'ectothermie se définit par opposition à l'homéothermie des mammifères qui doivent maintenir leur température corporelle constante et lutter contre les variations de température du milieu de vie (la température des poissons suit la température du milieu et se situe en général un degré au dessus).
- L'ammoniothélie est l'excrétion des déchets azotés majoritairement sous forme d'ammoniac. La production d'ammoniac est une réaction nettement moins coûteuse que la synthèse d'urée.
- La flottaison est la portance assurée par le milieu lui-même. Les mammifères terrestres sont soumis à la force de gravité et doivent maintenir activement leur équilibre par un squelette solide et par le jeu des forces musculaires antagonistes. Chez les poissons, il n'y a pas besoin de maintien de la masse, seulement d'un maintien de la forme et de points d'appui pour les masses musculaires.

Le métabolisme des poissons au repos est difficile à mesurer car le maintien dans la colonne d'eau nécessite des mouvements. On mesure plutôt une dépense énergétique minimale, sur des poissons à jeun et incluant l'activité physique résiduelle de flottaison. Lorsque l'animal est à jeun, l'énergie est fournie par la dégradation de ses réserves corporelles. Pendant les premiers jours de jeûne, les protéines sont les principaux pourvoyeurs d'énergie. Quand le jeûne se prolonge, l'énergie est de plus en plus apportée par les lipides corporels.

Les besoins énergétiques varient en fonction de :

- la taille des poissons. Les larves de poissons et les petits poissons ont des besoins énergétiques par unité de masse corporelle considérablement plus élevés que les poissons de grande taille. Ainsi, des juvéniles de moins de 3 grammes consomment plus de 20% de leur poids sec par jour alors que les adultes consomment moins de 1% de leur poids par jour. La relation entre le métabolisme et la masse corporelle est traduite par la notion de masse métabolique (Guillaume *et al* (1999)). C'est la masse corporelle de l'animal élevée à une puissance correspondant à la pente de la relation logarithmique. Pour les vertébrés supérieurs, l'exposant 0,75 est utilisé. Pour les poissons, le coefficient le plus utilisé est 0,82.
- la température de l'eau. L'augmentation de la dépense énergétique minimale en fonction de la température de l'eau est indépendante de la taille du poisson.

Lorsqu'ils sont nourris à satiété, les poissons ajustent leur consommation à la densité énergétique de l'aliment, de façon à atteindre une croissance maximale. L'ajustement n'est pas toujours exact, surtout si l'aliment est pauvre en énergie. En effet, quand la teneur en énergie de l'aliment diminue en dessous de 15MJ ED/ kg MS, la capacité de régulation physique est limitante, en particulier à cause du volume de l'estomac. Le besoin énergétique de croissance peut être défini comme la quantité d'énergie nécessaire pour produire un kilogramme de poisson. La composition du gain corporel (teneur en protéines et en lipides) influence le besoin énergétique de croissance.

Ce besoin est également fonction de la composition du régime : l'orientation des nutriments vers l'anabolisme ou le catabolisme dépend de l'équilibre entre l'énergie protéique et l'énergie non protéique (cf. « effet d'épargne »). D'après Pennell *et al* (1996), les tables dressant les besoins des salmonidés précisent que les besoins en protéines et en énergie par gain de poids sont de 8 à 10 kcal d'énergie digestible / g de protéines. Or, la production de chaleur d'une truite à la température de 15°C demande à peu près 5% de ce qu'elle coûte à un mammifère terrestre ou un oiseau de la même taille à la même température. Cette production de chaleur pour une truite de 100 g est de 1 kcal/j (selon Smith, 1976 cité dans Pennell *et al*, (1996)). En moyenne, un aliment contient 3 kcal d'ED par gramme et les truites consomment 6 kcal d'ED par jour. Il reste donc de l'énergie disponible pour autre chose puisqu'elles consomment 6 fois le besoin d'entretien). Ainsi, c'est 85% de l'énergie disponible de l'aliment qui est en théorie disponible pour la croissance.

Le **bilan énergétique** s'exprime sous la forme suivante :

Energie nette = énergie ingérée – (pertes fécales + pertes urinaires + pertes métaboliques) – pertes de chaleur

On considère usuellement que l'énergie ingérée se distribue de la manière suivante :

- 44 % (± 7%) pour le métabolisme,
- 29 % (± 6%) pour la croissance,
- 27% (± 3%) pour l'excrétion fécale et les pertes azotées.

La figure 13 établit le lien entre la distribution des dépenses énergétiques des poissons et la quantité d'énergie ingérée. Les pertes de chaleur sont mesurées par la différence entre la dépense énergétique de poissons à jeun et de poissons alimentés. Le gain en énergie augmente d'abord linéairement en fonction de l'énergie digestible ingérée. Au dessus d'un certain seuil, la relation devient curvilinéaire : les pertes de chaleur augmentent plus vite que l'ingestion d'énergie. Cette saturation correspond à la saturation de capacité maximale de synthèse protéique.

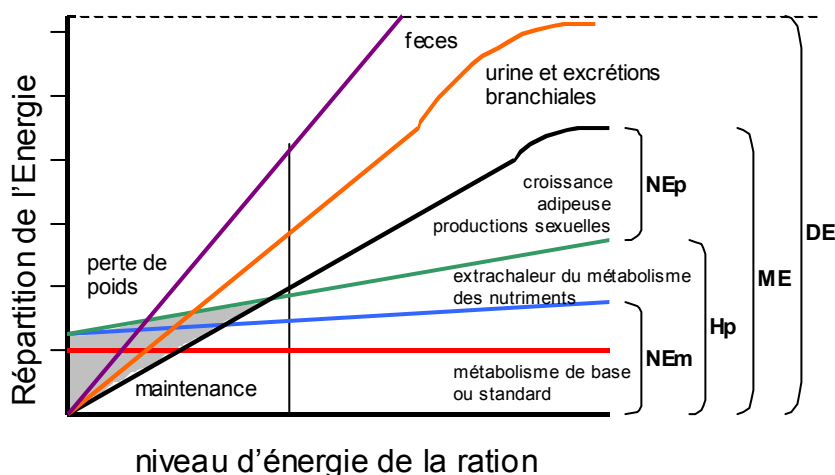


Figure 13 : Distribution de l'énergie chez des poissons en croissance alimentés avec différents niveaux de ration (d'après ARC/NAS 1981, cité dans Pennell *et al.*, (1996)).
 DE : énergie digestible
 ME : énergie métabolisable
 NEp : énergie nette pour les productions
 NEm : énergie nette pour la maintenance
 Hp : production de chaleur

La forme de l'énergie déposée varie en fonction de l'âge des poissons. Au départ de leur vie, les salmonidés déposent majoritairement des protéines. Au-delà de 2 ans, la plupart des dépôts sont de nature lipidique. La rétention d'énergie représente en moyenne 35 à 65% de l'énergie digestible ingérée. L'efficacité de rétention de l'énergie est supérieure chez les poissons grâce à de faibles dépenses énergétiques liées au métabolisme de base. Elle est cependant dépendante de la température et n'est maximale qu'autour de l'optimum thermique du poisson qui est de 10 à 17°C pour le saumon atlantique (d'après Plumb (1999)) .

D. Nutrition protéique

a) Particularités du métabolisme protéique chez le poisson

Les **acides aminés** libres ont trois origines possibles. Ils sont issus soit :

- de l'absorption intestinale après hydrolyse des protéines alimentaires (source principale),
- de synthèses et d'inter conversions,
- de l'hydrolyse de protéines de l'organisme.

Les 10 acides aminés essentiels ne peuvent être synthétisés et sont impérativement issus de l'alimentation. Ce sont les mêmes acides aminés que pour les vertébrés supérieurs, à savoir : arginine, histidine, isoleucine, leucine, lysine, thréonine, tryptophane, valine, méthionine et phénylalanine. Contrairement aux animaux uréothéliques, chez les poissons l'arginine ne peut pas, être apportée par le cycle de l'urée. Les poissons ont également deux acides aminés semi essentiels, la cystéine et la tyrosine, qui ne peuvent être produits qu'à partir d'acides aminés essentiels.

❖ Métabolisme des acides aminés

Les acides aminés peuvent servir à la synthèse de protéines corporelles ainsi que d'hormones, de bases puriques, de créatinine et de triméthylamine. La taurine et la triméthylamine sont des acides aminés qui interviennent dans l'osmorégulation. Les poissons ont la particularité d'oxyder la majorité des acides aminés afin de produire de l'énergie et de l'ammoniaque, soit par désamination directe, soit par transdésamination (transfert du groupe aminé à un accepteur commun qui sera désaminé à son tour).

La concentration en acides aminés libres dans le plasma est le reflet de la richesse de l'alimentation et du rapport anabolisme/ catabolisme protéique (cf paragraphe II D a). La lysine est un acide aminé insulino-trophique. L'insuline et l'insuline-growth-factor (IGF) agissent en tant qu'immuno-modulateurs du métabolisme protéique. Les teneurs plasmatiques en ammonium augmentent dans le plasma à cause d'un déséquilibre en lysine et de fortes teneurs en acides aminés libres (Eikeland (1998)).

La teneur plasmatique en acides aminés totaux dépend de la solubilité des protéines alimentaires et de l'heure du prélèvement par rapport au repas (Espe, (1999)).

Tableau 6 : Comparaison des délais séparant le repas du pic plasmatique en acides aminés et du retour au niveau basal en fonction du type d'aliment. Plus les aliments contiennent des fractions digérées d'acides aminés, et plus le pic plasmatique en acides aminés et le retour au niveau basal sont rapidement atteints. D'après Espe, (1999).

	Pic plasmatique en acides aminés	Délai pour un retour au niveau basal
Aliment standard	3 – 12 h	24 h
Concentré déchets	3 – 6 h	12 – 24 h
Concentré entiers	3 h	12 – 24 h

❖ Synthèses protéiques et croissance

La **capacité de synthèse des protéines** est différente en fonction du tissu concerné. Le foie est l'organe majoritaire pour la synthèse des protéines. Les branchies, le tube digestif, le muscle rouge et le muscle blanc ont une capacité plus limitée de synthèse de protéines. Les protéines synthétisées sont ensuite retenues dans le muscle blanc des poissons (50 à 70%).

Le croissance du poisson se fait par formation de nouvelles fibres (**hyperplasie**) qui dans un premier temps permet l'achèvement de la myogenèse embryonnaire et la formation des différentes couches musculaires. Dans un deuxième temps, l'hyperplasie concerne toutes les couches musculaires et en particulier le muscle blanc qui prend une apparence de mosaïque. L'hyperplasie se déroule principalement lors du stade juvénile, jusqu'à ce que le poisson acquière une certaine taille au-delà de laquelle la croissance se déroule par grossissement des fibres existantes (**hypertrophie**) (Bjornevik (2003)). Chez les vertébrés supérieurs, la croissance se fait par simple hypertrophie, en général.

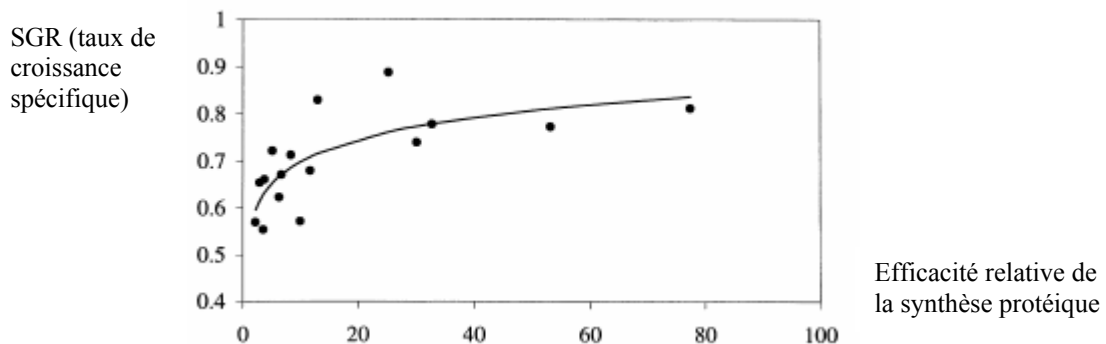
Le renouvellement des protéines dans le muscle est faible, le besoin protéique pour le turn-over des protéines musculaires est donc faible. On peut donc estimer que le besoin nutritionnel en protéines représente le besoin en acides aminés pour la croissance, et que les apports endogènes sont négligeables. Par rapport aux vertébrés supérieurs, les pertes de protéines sont limitées.

L'intensité du métabolisme protéique diminue avec l'âge du poisson : la synthèse, l'accrétion et la dégradation des protéines endogènes diminuent lorsque les saumons vieillissent. Lors d'un jeûne, la synthèse des protéines ne change pas mais la dégradation des acides aminés pour la production de glucose augmente. Quand les poissons sont nourris, la synthèse des protéines augmente en fonction de la disponibilité en substrats. La dégradation des protéines augmente également mais stagne lorsque les besoins d'entretien sont couverts. Lorsque la ration alimentaire augmente, le bilan est donc plus favorable à l'accrétion protéique.

La majeure partie de l'augmentation du poids des saumons est la conséquence du dépôt de protéines. La figure 14 permet de représenter l'évolution de la croissance de saumons de 340 g en fonction de l'efficacité des synthèses protéiques. Le dépôt de protéines résulte du bilan entre l'anabolisme et du catabolisme. L'efficacité de la synthèse protéique et la croissance sont en principe corrélées à la quantité d'ARN présente dans les cellules des muscles blancs. La quantité d'ARN est exprimée en $\mu\text{g/g}$ de tissu.

L'intensité de l'utilisation de ces ARN est traduit sous forme d'un « index d'activité ribosomale » du muscle qui est le ratio entre les protéines hydrosolubles (en mg/g de tissu) et la quantité d'ARN (en $\mu\text{g/g}$ de tissu). En pratique, l'activité spécifique de l'ARN et l'efficacité de la synthèse protéique sont mesurées par l'injection d'une dose d'acide aminé marqué et par le suivi de l'incorporation de cet acide aminé dans des protéines néo-synthétisées. Ces deux indices changent après un repas (d'après Sveier (2000)).

Figure 14 : Relation entre la croissance, exprimée en taux spécifique de croissance, et l'efficacité de synthèse des protéines (protéines hydrosolubles/ ARN). Lorsque l'efficacité de la synthèse protéique augmente, le taux de croissance augmente également de manière curvilinéaire avec une croissance qui plafonne à 0,8% du poids du corps par jour et ce, dès que les valeurs de l'efficacité de la synthèse protéique atteignent 40% (d'après Lygren, (1999)).



Il n'y a pas de corrélation entre la synthèse des protéines sur 2 h et le taux de croissance sur 12 semaines. Le manque de corrélation met en lumière le fait que c'est **le catabolisme qui contrôle la croissance des poissons** (et non pas l'anabolisme) (Sveier (2000)).

La fréquence des repas, ainsi que la qualité des protéines alimentaires influent sur le taux de renouvellement des protéines dans le foie et les muscles. Des protéines de mauvaise qualité, et des repas très fréquents sont accompagnés d'une élévation du taux de renouvellement des protéines corporelles. Le remplissage gastrique ou la solubilité des protéines sont deux paramètres qui modifient l'utilisation des protéines alimentaires.

La teneur en **acide glutamique** des muscles indique également le niveau de synthèse protéique alors que la **glycine et l'hydroxyproline** dans les muscles sont des marqueurs du métabolisme du collagène au moment du remodelage des tissus en développement (Lygren (1999)).

❖ Catabolisme azoté

La majorité (80%) de l'azote issu du catabolisme azoté est **excrétée sous forme ammoniacale**. L'ammoniaque (NH_3) est extrêmement toxique mais, aux pH physiologiques, ce composé est sous forme ionisée (NH_4^+). Cette forme est moins toxique et est éliminée par les branchies ou par l'urine. Une petite fraction de l'azote provenant du catabolisme des purines et de l'arginine est excrétée sous forme d'urée.

L'arginase est une enzyme qui réalise la réaction suivante (d'après Bhandari *et al*, (2003)):
arginine \rightarrow ornithine + urée.

L'activité de l'arginase diminue si les apports alimentaires en arginine sont faibles : quand l'activité de cette enzyme diminue, la synthèse des protéines diminue également. L'activité de l'arginase est soumise à rétrocontrôle négatif par la lysine et l'ornithine. Un excès d'apport en lysine dans l'aliment peut cependant être contrôlé par l'addition d'arginine dans ce même aliment.

La production d'urée chez les téléostéens est due au métabolisme des purines et à l'action de l'arginase. Le niveau d'urée du plasma est fonction du niveau d'arginine de l'aliment. Beaucoup de lysine dans un aliment diminue la teneur en urée du plasma grâce à une diminution la dégradation de l'arginine. Cependant, quand l'aliment est carencé en lysine, l'urée reste basse.

b) Besoins en protéines et acides aminés indispensables

A l'instar des mammifères, le **besoin absolu** (en g/jour) des poissons suit la même évolution que la taille des poissons, alors que le besoin relatif (en g/kg de poids vif/jour) suit une évolution inverse, il a tendance à diminuer au fur et à mesure que les poissons sont plus gros (cf. figure 6, paragraphe II).

Lors des expérimentations étudiant les besoins protéiques, plusieurs facteurs peuvent biaiser les résultats :

- la composition en lipides et en cellulose de l'aliment,
- l'équilibre en acides aminés indispensables de l'aliment,
- la restriction de la distribution de l'aliment et/ou de l'apport en protéines : le coefficient d'efficacité protéique et la valeur biologique sont maximaux pour une teneur en protéines alimentaires nettement inférieure au besoin,
- la forme des acides aminés : les acides aminés purifiés sont absorbés rapidement, mais l'efficacité de la synthèse protéique est diminuée. S'ils sont enrobés, leur absorption est retardée et l'utilisation métabolique est améliorée. Lorsqu'ils sont apportés sous forme de protéines dénaturées, la structure quaternaire et tertiaire des protéines est détruite, ce qui expose la chaîne des polypeptides à une dégradation plus efficace (Sveier et al (2000)).
- l'acidité du mélange des acides aminés diminue l'appétence du poisson et augmente la pression osmotique dans l'estomac. L'absorption des nutriments est ainsi perturbée.

Le **besoin relatif des poissons en protéines** (g de protéines/kg de poids vif/jour) est extrêmement élevé même si le besoin d'entretien est plus faible que chez les mammifères. Le besoin de croissance est équivalent à celui des autres vertébrés : en effet, le faible renouvellement des protéines du tissu musculaire permet une synthèse apparente dont le coût est, pour l'organisme entier, du même ordre de grandeur que chez un vertébré supérieur. Cependant, comme le catabolisme direct des acides aminés apportés par voie alimentaire est extrêmement élevé et que les acides aminés précurseurs sont principalement ceux issus de l'apport alimentaire, le besoin relatif total des poissons est plus élevé que celui des autres vertébrés et doit être couvert par l'alimentation.

La sélection génétique modifie aussi les besoins absolus : les animaux à forte production consomment beaucoup plus que les animaux non sélectionnés sur les critères de croissance.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la quantité d'aliment consommée chez des saumons nourris à volonté varie pour des aliments plus ou moins riches en énergie et est régulée de manière à assurer un apport en énergie digestible constant. Comme le rapport protéines / énergie de différents aliments est relativement stable, la quantité d'énergie digestible ingérée est constante de même que la quantité de protéines ingérées.

Les **besoins en acides aminés essentiels** (exprimés en g/16 g d'azote) sont comparables aux besoins des vertébrés supérieurs. Les poissons étant non uréothéliques, la principale différence porte sur l'arginine qui ne peut être produite à cause de l'absence de cycle de l'urée. La rétention des protéines est optimale lorsque le ratio acides aminés essentiels/non essentiels est proche de 50%. Les besoins en acides aminés indispensables sont détaillés dans le tableau 5. Ce tableau dresse également le lien entre les besoins des poissons et les particularités métaboliques de chaque acide aminé.

Tableau 7 issu des tables de recommandations nutritionnelles, d'après National Research Council, (1993).

Acide aminé	Besoin en g/16 g d'azote	Particularités métaboliques
Arginine	2,2 – 6,0	Si salinité et teneur en ammoniacque de l'eau ↑, la synthèse d'urée ↑. Sert à la synthèse de créatine. Déclenche sécrétion d'insuline et d'hormone de croissance. Précurseur du monoxyde d'azote (NO), médiateur central des fonctions cellulaires
Histidine	0,9 – 2,7	Concentration élevée dans le muscle. Pouvoir tampon. Se lie aux ions métalliques (dans le site actif d'enzymes).
Isoleucine	1,2 – 4,4] Antagonistes des mécanismes de transport. Métabolisés dans le muscle
Leucine	2,7 – 8,4	
Valine	0,2 – 1,1	
Lysine	3,8 – 6,6	Absorption inhibée par l'arginine. Précurseur de la carnitine.
Thréonine	1,3 – 3,6	Précurseur de la sérotonine (neurohormone)
Tryptophane	2,0 – 6,5	AA soufré. Permet de produire cystéine. Donneur de méthyl.
Méthionine	0,6 – 5,0	Précurseur de la choline. Protection contre radicaux libres.
Phénylalanine	0,6 – 5,5	AA aromatiques inclus dans la synthèse d'hormones thyroïdiennes et de pigments (mélanine).

L'étude de Berge (1998) a permis de définir les recommandations en lysine, en arginine et en ornithine. Des saumons de 376 g ont été nourris avec des aliments riches en énergie (23,6 MJ/g) contenant des teneurs variables en lysine. Pour ce faire, une partie de la farine de poisson a été substituée par de la zéine (protéine issue du maïs, riche en leucine et en proline),

et par des acides aminés purifiés. La zéine utilisée seule, de part son déséquilibre en acides aminés, offre des performances de croissance plus limitées que la farine de poisson .

Tableau 8 : Synthèse de l'étude de Berge (1998) mesurant l'effet de différents teneurs en lysine sur les performances de croissance et d'utilisation de l'aliment de saumons atlantique.

Niveau en lysine de l'aliment	FCR :	SGR :	Résultats
Faible : 5,9	$2 \pm 0,7$	$0,22 \pm 0,07$	Croissance réduite et diminution de l'utilisation de l'aliment
Faible : 7	$2,1 \pm 0,4$	$0,28 \pm 0,03$	
Moyen : 14	$1,1 \pm 0,1$	$0,49 \pm 0,02$	Croissance comparable au standard
Normal : 18	$0,9 \pm 0,1$	$0,60 \pm 0,02$	
Elevé : 21	1	0,56	Aveugles , d'où croissance réduite
Standard : 26,4 (farine de poisson)	$0,9 \pm 0,1$	$0,69 \pm 0,01$	Croissance correcte par rapport aux valeurs usuelles dans ces conditions de température de l'eau et d'âge des poissons.

FCR* : g d'aliment sec ingéré/ g de poids vif

SGR* : cf. définitions

La lysine constitue 90 g/kg des protéines musculaires des saumons d'élevage. Les recommandations sont de 17 à 18 g/kg d'aliment (sauf pour les larves : 19,9 g/kg d'aliment). Les besoins en lysine peuvent être exprimés de deux manières, soit 18 g/kg de MS d'aliment soit 0,84 g/MJ ED.

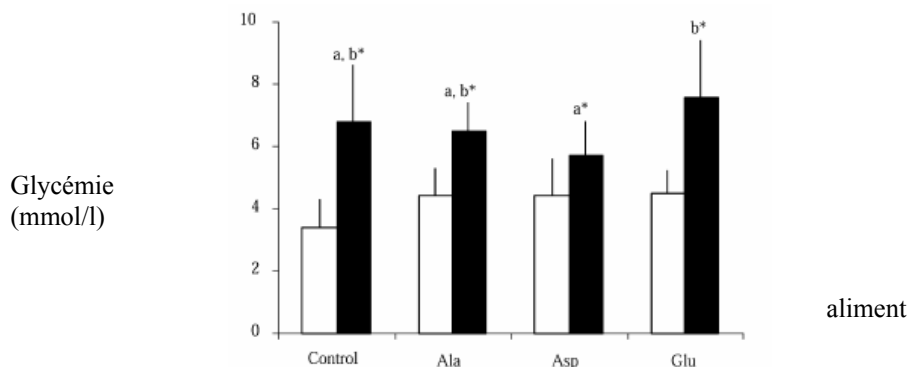
La croissance (exprimée sous forme de taux de croissance spécifique ou SGR) et l'utilisation de l'aliment (exprimée par le taux de conversion de l'aliment ou FCR) se dégradent si on distribue un excès de lysine. Un aliment riche en leucine perturbe l'absorption de la lysine et de l'arginine, et ce positivement ou négativement en fonction de la teneur en lysine de l'aliment.

L'ornithine décarboxylase est une enzyme du cytosol qui catalyse la dégradation d'ornithine en putrescine. C'est la première étape et la phase limitante de la synthèse de spermidine et de spermine qui aboutit à la synthèse d'ARN, d'ADN, et à la régulation de la croissance. Quand la teneur de l'aliment en lysine augmente, les niveaux d'activité de l'ornithine décarboxylase du foie augmentent également. Dans les muscles, c'est le contraire : en cas d'excès de lysine, moins d'ornithine est absorbée, il y a donc moins d'ornithine dans le plasma et dans les muscles, donc moins d'activité.

Des niveaux de lysine supérieurs aux apports recommandés ne permettent pas d'augmenter la croissance, et diminuent la dégradation de l'arginine.

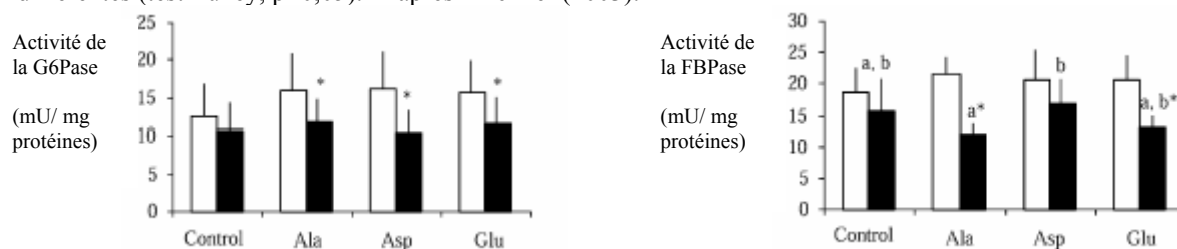
L'étude de Krichner (2003) a mesuré les effets d'une substitution d'une partie de la source azotée (farine de poisson) par des acides aminés : alanine, asparagine et acide glutamique sur le métabolisme du glucose, chez des truites.

Figure 15: Teneurs plasmatiques en glucose de truites nourries (en noir) ou à jeun (en blanc). La glycémie moyenne des poissons nourris est significativement différente de celle de poissons à jeun lorsque la colonne est annotée d'un * (test de student, $p < 0,05$). Pour les poissons nourris, les moyennes sont significativement différentes lorsque les colonnes sont annotées de lettres différentes (test Tukey, $p < 0,05$). d'après Kirchner (2003).



Des apports 2 à 3 fois supérieurs aux besoins en acides aminés néoglucogéniques n'augmentent pas la capacité d'expression des enzymes de la néoglucogénèse. On observe même une inhibition des deux enzymes clefs (glucose-6-phosphatase et fructose-1,6-biphosphatase selon la figure 16) lorsque les poissons sont nourris. Le mécanisme de cette diminution d'activité n'est pas connu, on considère d'habitude que l'expression de ces enzymes est sous contrôle génétique.

Figure 16 : Activités d'enzymes de la néoglucogénèse de truites nourries (en noir) ou à jeun (en blanc). Les différences d'activité sont significatives lorsque la colonne est annotée d'un * (test de student, $p < 0,05$). Pour les poissons nourris, les moyennes sont significativement différentes lorsque les colonnes sont annotées de lettres différentes (test Tukey, $p < 0,05$). D'après Kirchner (2003).



Les différences d'activité d'enzymes de la néoglucogénèse n'ont pas d'effet significatif sur la glycémie post-prandiale des poissons. Nourrir des truites avec un excès d'alanine, d'asparagine ou d'acide glutamique n'a pas d'effet négatif sur l'utilisation du glucose. Ce sont principalement les apports alimentaires en glucides qui modifient la capacité de stockage et d'utilisation du glucose. Dans le cas de cette expérience, les aliments contenaient beaucoup de protéines (53% de la MS) et peu de glucides (11 à 13%), l'effet sur le métabolisme glucidique peut avoir été masqué, d'autant plus que les mesures se sont déroulées à un instant « T », sans notion de la dynamique de production et d'utilisation du glucose.

Les farines de poisson, pour des raisons de disponibilité des ressources marines, sont de plus en plus substituées par des farines de végétaux, souvent déséquilibrées en acides aminés (Kirchner (2003)). Ce déséquilibre ne semble pas occasionner de troubles du métabolisme glucidique, tant que les besoins de base sont couverts.

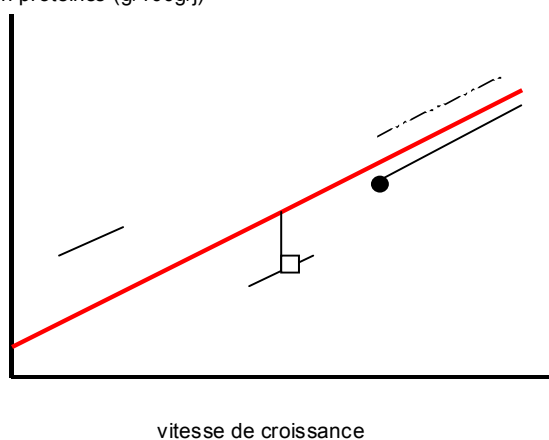
c) Couverture des besoins

Afin de couvrir les besoins des saumons, on peut formuler les aliments à partir, soit :

- du besoin en protéines puis on équilibre l'apport en acides aminés indispensables grâce à une augmentation de la teneur en protéines de l'aliment, ou en apportant un complément, ou enfin en associant plusieurs sources de protéines.
- de la quantité de protéines ingérées par unité de masse ou taux de croissance spécifique. En effet, le besoin absolu est proportionnel à la croissance. Il existe une corrélation linéaire entre le besoin et le taux de croissance ce qui permet d'utiliser des abaques afin de déterminer les besoins d'une espèce à un instant « T » (cf. figure 17).

Figure17 : Relation entre besoin en protéines (exprimé en quantité journalière par 100g de biomasse) et taux de croissance (d'après de Tacon et Cowey (1985) cité dans Guillaume et al (1999)).

besoin en protéines (g/100g/j)



La courbe en rouge représente l'abaque de l'espèce. Les courbes parallèles sont des exemples de courbes d'autres espèces. On peut estimer le besoin protéique en fonction de ces abaques et du taux de croissance.

Le coefficient de régression de la droite est $r = 0,177$ (rapport de la quantité de protéines dans la ration/SGR).

Il existe des interactions entre les acides aminés. Elles doivent être prises en compte dans la formulation. Comme vu précédemment, le **métabolisme de la lysine** est antagoniste de celui de l'arginine (Eikeland *et al* (1998)). Ils sont affectés par le Na^+ , le K^+ , le Cl^- et le pH. Une augmentation des apports en lysine diminue l'utilisation de l'arginine. Les teneurs en arginine libre dans le plasma et les muscles sont similaires. La concentration plasmatique maximale en arginine est obtenue avec un aliment à 18 g/kg de lysine. Au-delà, le niveau en arginine diminue. Cet effet n'est pas observé lors d'une alimentation supplémentée de manière concomitante en arginine (90% de l'effet inhibiteur de la lysine en excès peut être comblé par un enrichissement équivalent en arginine).

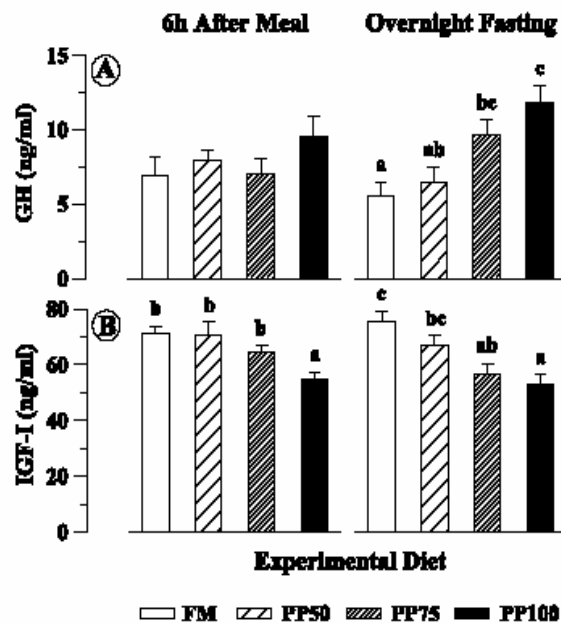
La taurine joue un rôle important dans la régulation du volume cellulaire et de l'osmolarité, dans le fonctionnement de la rétine, et est considérée comme essentielle pour le développement des poissons pélagiques. L'inclusion de protéines végétales telles que la zéine du maïs permettent d'augmenter les teneurs musculaires en taurine via un apport alimentaire augmenté en acides aminés soufrés. Des déficits en cystéine ou en méthionine peuvent donc faire diminuer la teneur hépatique et musculaire en taurine. La taurine participe également à la conjugaison des acides biliaires, d'où une action hypocholestérolémiant. Les **teneurs basses en cholestérol des régimes riches en protéines végétales**, associées à des teneurs basses en taurine peuvent donc être liées à une utilisation de la taurine pour former des sels biliaires (d'après Gomez-Requeni *et al*, (2004)).

L'axe hormone de croissance (GH) – foie fournit un signal influençant la croissance et la répartition des nutriments. La résistance du foie à la GH et l'augmentation des niveaux

plasmatiques en GH sont observées en périodes de restriction alimentaire et de malnutrition. Cette réaction favorise la mobilisation des réserves lipidiques.

Figure 18 : Suivi des teneurs plasmatiques en GH et IGF₁ de daurades royales nourries avec 4 aliments différents 6 heures après le repas ou à la suite d'une nuit de jeûne. Des valeurs avec des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$). Les aliments avaient une partie variable de farine de poisson substituée par un mélange de farine de maïs, blé, pois extrudé, colza et lupin doux. FM est l'aliment tout poisson, PP50 est celui dont 50% de la farine de poisson est substituée. (d'après Gomez – Requeni *et al* (2004))

6 heures après un repas, les niveaux de GH circulante n'étaient pas différents entre les groupes. Après une nuit de jeûne, la teneur en GH chez les poissons nourris avec l'aliment FM était plus basse que pour les lots PP75 et PP100.



Des études antérieures ont montré que les niveaux plasmatiques en GH changent lorsque la taille de la ration et les ratios protéines/énergie sont modifiés.

De plus, **des modifications de proportions en acides aminés essentiels/non essentiels peuvent induire une résistance hépatique à la GH et par voie de conséquence une réduction des taux de croissance** (Gomez – Requeni *et al* (2004)). L'activité de l'axe GH-foie semble donc être modifiée par l'alimentation. Lorsque la ration contient plus de protéines végétales, la teneur en triacylglycérol et en glucides diminue plus fortement après un jeûne d'une nuit, les teneurs plasmatiques en GH sont donc d'autant plus élevées.

Les niveaux plasmatiques en IGF-1 sont dépendants du type d'aliment : les teneurs en IGF-1 diminuent quand la substitution de farine de poisson par des farines végétales augmente (cf. figure 18). L'IGF-I est un des éléments du rétrocontrôle négatif de la GH. Lorsque la teneur en IGF-1 diminue, la teneur en GH augmente en parallèle: cette relation est particulièrement marquée chez les poissons recevant **l'aliment PP100 (100% végétal), ce qui est le reflet d'une désensibilisation du foie à l'action de la GH qui est un trait caractéristique des états cataboliques.**

D'un point de vue pratique, deux principes sont utilisés pour la nutrition protéique :

- **la couverture des besoins en protéines totales et acides aminés essentiels, et l'équilibre de ces acides aminés entre eux.** Des apports optimaux en acides aminés essentiels sont indispensables afin de maximiser la croissance protéique. Ainsi, compléter les farines végétales avec les acides aminés dont elles sont déficientes permet d'augmenter leur valeur nutritive. Quand les acides aminés sont présents dans des teneurs appropriées, une synthèse protéique efficace se met en place (Gomez – Requeni *et al* (2004)).
- **l'optimisation de l'utilisation des protéines, en tirant parti au maximum de l'effet d'épargne des protéines.**

On peut tirer parti au maximum de l'**effet d'épargne** de la manière suivante : le rapport Protéines digestibles/ Energie Digestible de l'aliment est diminué avec des aliments contenant de fortes teneurs en lipides, moins d'énergie provient du catabolisme des protéines. De tels aliments permettent d'excellentes performances d'élevage (indice de consommation, pollution de l'eau).

E. Nutrition lipidique

L'apport de lipides dans l'alimentation des poissons permet de couvrir leurs besoins en acides gras essentiels nécessaires à la synthèse de prostaglandines et au maintien de l'intégrité des structures membranaires. Ils servent aussi de vecteur à l'absorption de composés liposolubles (vitamines et pigments caroténoïdes). Enfin, ils ont un rôle majeur dans la fourniture d'énergie. Comme pour les mammifères terrestres, la teneur en lipides augmente au cours de la vie des poissons et fluctue en fonction des saisons. Les changements saisonniers de composition corporelle sont corrélés à la disponibilité de l'aliment très marquée chez les poissons sauvages (Cowey, (1993)). Le pic de la teneur en matières grasses corporelles est observé en été, et le point le plus bas est rencontré en fin d'hiver.

Tableau 9 : Représentation et description des principaux lipides rencontrés chez les poissons.

Lipides	conformation
Triacylglycérol	<p>Triesters de glycérol et de 3 acides gras</p>
Phospholipides	<p>Phosphatidylethanolamine (a cephalin)</p> <p>Esters de deux acides gras (<i>fatty acid unit</i>) et d'un acide phosphorique lié par une fonction diester à un alcool (choline, sérine...)</p>
Cérides	<p>Lipides propres au milieu marin</p> <p>Esters d'un acide gras et d'un alcool gras</p>

Le milieu aquatique est riche en acides gras polyinsaturés (AGPI) à longue chaîne (C20 ou plus). Les poissons ont des besoins très élevés en acides gras de la série oméga 3 ($\omega 3$ ou n-3). Ces acides gras sont également recherchés dans les poissons destinés à l'alimentation humaine, surtout en prévention et pour le traitement des pathologies cardiovasculaires.

a) Rappels sur l'utilisation digestive et le métabolisme des lipides

❖ Digestion

Les lipides sont en général bien ou très bien digérés. Leur digestibilité dépend de leur point de fusion (fonction du degré d'insaturation et de la longueur de la chaîne carbonée).

L'hydrogénation des huiles, qui améliore leur résistance à l'oxydation, les rend donc moins digestibles. Le coefficient d'utilisation digestive des triglycérides et des acides gras libres est situé entre 90 et 98 % chez le saumon atlantique. La digestibilité des acides gras saturés est nettement moindre (entre 30 et 70 %).

La digestion des lipides varie en fonction des propriétés physico-chimiques des acides gras, de leur position sur les triglycérides et des techniques d'émulsion utilisées par le poisson (D'après Menoyo *et al.*, (2003)). Des études, telles que celle de Bell *et al.*, (2002) suggèrent même que les saumons peuvent discerner les acides gras entre eux en les employant soit pour un dépôt sélectif, soit pour la production d'énergie.

Tableau 10 : Digestibilité des acides gras en fonction de la teneur en AGPI de la série n-3 et de la teneur en acides gras saturés (en %). La digestibilité des acides gras saturés varie en fonction de ces deux composantes. La digestibilité des acides gras monoinsaturés et des AGPI varie en fonction de la teneur de l'aliment en acides gras saturés. D'après Menoyo D. *et al.*, (2003).

Teneur en acides gras de l'aliment	Peu de n-3		Beaucoup de n-3	
	Peu saturés	Beaucoup saturés	Peu saturés	Beaucoup saturés
Niveaux AG saturés	18,8	30,3	19,1	31,6
Niveaux d'AG monoinsaturés	55	43,1	39	27,9
Niveaux AGPI	19,8	20	35	34
<i>Dont Oméga 6</i>	4,4	4,9	5,5	6,0
<i>Dont oméga 3</i>	15,4	15,1	29,5	28
<i>Ratio oméga 3/6</i>	3,5	3,1	5,4	4,7
SGR	0,39	0,40	0,33	0,22
Teneur en lipides musculaires	11,81	12,09	14,43	16,14
Digestibilité apparente lors de l'expérience :				
- lipides totaux	93,13	80,55	91,78	77,11
- AG saturés	85,49	52,41	72,58	43,28
- AG monoinsaturés	94,20	92,98	95,46	91,32
- AG n-6	94,42	93,32	95,45	93,30
- AG n-3	98,08	97,13	98,76	97,88

Les aliments les plus digestibles sont ceux qui contiennent peu d'acides gras saturés et peu d'oméga 3. La digestibilité des acides gras saturés diminue quand leur teneur dans l'aliment augmente et, en parallèle, cela diminue l'absorption des acides gras mono-insaturés et des oméga 6 et 3. De faibles niveaux d'acides gras saturés sont facilement digérés.

Il existe néanmoins un **niveau critique** au-delà duquel la formation des émulsions et des micelles est affectée. La digestibilité et l'absorption des acides gras diminue quand la saturation et la longueur de la chaîne augmente, et quand la teneur en oméga 3 augmente. Ce phénomène est principalement dû à des raisons d'accessibilité des systèmes enzymatiques aux sites d'action.

La digestibilité du C18:0 (acide stéarique) est la plus faible (digestibilité apparente <60%). La digestibilité du C16:0 (acide palmitique) diminue et passe de 91 à 42% si les teneurs en acides gras saturés et oméga 3 augmentent (de 19 à 30% et de 15 à 29% respectivement). Il en est de

même pour l'activité des enzymes musculaires qui diminue quand la teneur en acides gras saturés augmente, sauf avec le C14:0. Les acides gras saturés sont utilisés préférentiellement pour la fabrication d'énergie, surtout en deçà d'une longueur critique de 14 carbones. Le C14:0 ou acide myristique subit également une élongation mitochondriale pour former du palmitoyl-CoA grâce à l'enzyme musculaire cardiaque L-3-hydroxyacyl-CoA deshydrogénase (L3HOAD).

L'acide docosahexaénoïque ou **DHA est hautement digestible**. Il y a une corrélation négative entre la teneur de l'aliment en DHA et l'activité des enzymes musculaires. Dans les muscles, on trouve des teneurs en DHA supérieures à celles de l'aliment : le DHA est donc déposé de manière active et sélective dans les muscles du saumon.

Les caractéristiques physiques de l'aliment jouent un rôle essentiel dans l'accès des sels biliaires aux lipides. La digestibilité varie en fonction des techniques d'émulsion utilisées par le poisson. **Les lipides sont moins digests quand les granulés sont grossiers**. Il en est de même quand **la teneur en amidon dépasse 22%** car la texture de l'aliment est mieux gélifiée et la vitesse du transit est modifiée (D'après Sveier (2000)).

❖ Absorption

L'**absorption des acides gras dans les différents segments du tube digestif** a été étudiée par Denstadli *et al*, (2004): De plus en plus d'huile de colza est ajoutée aux rations des saumons, en particulier comme vecteur de C18:1,n-9 (acide trioléique). C'est un acide gras à chaîne moyenne, important en tant que source d'énergie facilement accessible. Des acides gras à différentes longueurs de chaîne sont absorbés à différents sites et à différents ratios le long du tube digestif (cf. figure 19).

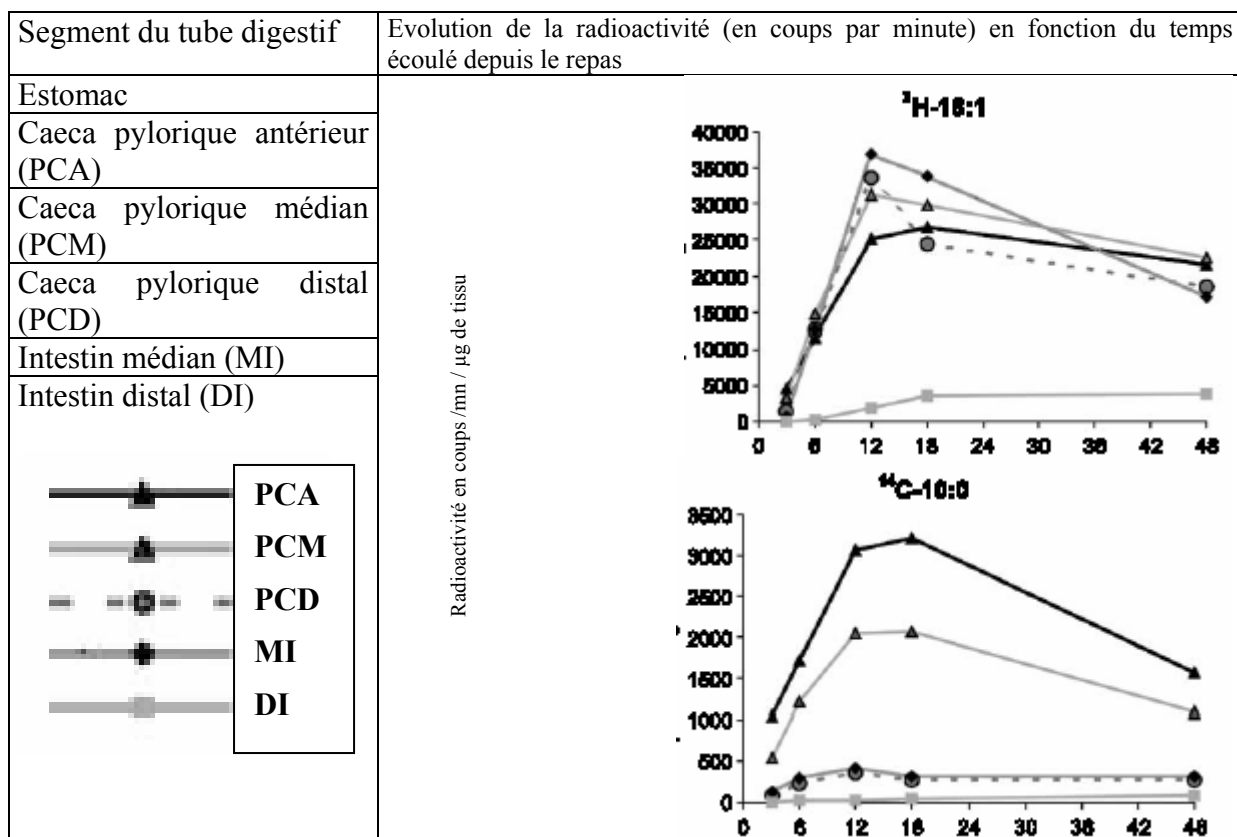
La radioactivité détectée dans l'estomac 3h après le repas peut avoir deux causes :

- soit quelques acides gras libres sont absorbés par la paroi de l'estomac, ce sont les acides gras de petite taille et amphiphiles. Le C18:1, de forme estérifiée est aussi absorbé.
- soit le substrat a adhéré au mucus.

70% des AG à chaîne moyenne sont absorbés dans la région du caeca pylorique. L'absorption des acides gras à longue chaîne est distribuée et répartie dans le temps, du caeca pylorique à l'intestin médian. **L'intestin médian est important pour l'absorption des acides gras à longue chaîne** après hydrolyse dans les régions proximales. Les acides gras saturés à longue chaîne sont moins digérés que les acides gras insaturés. Les C18:1 sont plus absorbés dans le caeca pylorique, car cette portion représente 65% du tractus digestif post-gastrique.

Les **acides gras à courte chaîne (8 à 12 atomes de carbone) sont absorbés rapidement par simple diffusion**. Les acides gras à longue chaîne (plus de 20 atomes de carbone) impliquent différentes protéines de transport. Comme les AG à courte chaîne sont absorbés rapidement, peu d'acides gras courts arrivent dans l'intestin distal, contrairement à une petite partie des acides gras à longue chaîne qui arrivent dans l'intestin distal et y sont absorbés (18 à 48h).

Figure 19 : Radioactivité dans les différentes zones intestinales évoluant au cours du temps suivant une administration forcée d'un repas avec des radio-isotopes (par µg de tissu). Quinze saumons ont été soumis à une alimentation forcée avec un aliment standard enrichi en acides gras libres marqués par des isotopes (C10:0 et C18:1). Ils ont été autopsiés 3, 6, 12, 18 et 48 heures après ce repas. D'après Denstadli V. *et al.*, (2004).



Les **acides gras absorbés** sont réestérifiés dans les entérocytes en TAG et PL. Le gras y est stocké de manière temporaire dans des vésicules lipidiques, formes de stockage spécifiques aux poissons, les « lipides étalés* » (d'après Sire et al., 1981; Fontagne et al., 1998; Olsen et al., 1999; Caballero et al., 2002 cités dans Denstadli et al (2004)). Ils sont ensuite incorporés dans des lipoprotéines qui sont acheminées vers le foie essentiellement par la voie lymphatique et à moindre échelle par la voie portale. Une partie des acides gras est transportée liée à l'albumine, via le système porte, surtout après un jeûne. La taille des chylomicrons modifie le temps de transport. Cette taille varie en fonction de la concentration en acides gras insaturés, du degré d'insaturation et de la voie métabolique de synthèse des esters. La capacité d'absorption du tube digestif est diminuée par le stress.

❖ Assimilation

La teneur en lipides augmente avec l'âge des poissons et fluctue en fonction des saisons. L'alimentation y joue un rôle déterminant. Quand la température varie, la quantité de lipides corporels ne change pas, c'est la composition en acides gras qui est modifiée. A basse température, la quantité d'acides gras poly-insaturés déposés augmente alors que la quantité d'acides gras saturés diminue. Une explication fonctionnelle à ce phénomène est que ces proportions évoluent afin de permettre le maintien du fonctionnement des cellules et de la fluidité membranaire à basse température grâce à la présence de lipides à bas point de fusion (d'après LeGouessant (2002)).

Tableau 11 : modification de la composition en acides gras dans les lipides corporels en fonction de la température de l'eau. Lorsque la température baisse, les lipides des saumons sont constitués de plus d'acides gras oméga 3, à bas point de fusion, qui restent donc fluides malgré la baisse de température.

Phospholipides totaux (% des acides gras dans les lipides corporels)		
	A 5°C	A 20°C
C 16 :0	16,5	22,4
C 20:4 (n-6)	3,2	2,7
C 20:3 (n-3)	3	1,9
C 20:5 (n-3)	4,1	2,2
C 22:6 (n-3)	35,2	33,4

❖ Métabolisme

Dans le foie, les lipides sont complexés aux apoprotéines avec du cholestérol libre pour former de nouvelles lipoprotéines. Le profil des lipoprotéines synthétisées varie en fonction de l'âge et du régime alimentaire des saumons. Entre 5 et 10% des lipides sont transportés sous forme d'acides gras libres.

Dans le plasma, les lipoprotéines subissent une transformation intra-vasculaire grâce à l'action de la lipoprotéine lipase qui se trouve dans le foie, les muscles, le coeur, les ovaires et le tissu adipeux. Les acides gras issus de cette hydrolyse sont soit utilisés par les cellules pour être stockés dans le tissu adipeux, soit comme source d'énergie.

Les phospholipides, essentiellement localisés dans les membranes des cellules et des organites cellulaires représentent une part relativement constante des tissus, et donc de la biomasse. Les triacylglycérols et les cérides constituent les lipides de réserve. Les tissus de stockage sont le foie, le tissu adipeux périviscéral et le muscle.

Chez les saumons, on distingue deux types de fibres musculaires locomotrices: les fibres rouges et les fibres blanches spécialisées respectivement soit pour se déplacer lentement, soit pour des sprints courts. Chez les poissons en général, les muscles axiaux sont majoritairement constitués de fibres blanches lentes recouvertes par une fine couche de fibres rouges lentes séparées entre elles par une fine couche de fibres roses intermédiaires mais ces dernières ne sont pas présentes chez les salmonidés (figure 20).

Les fibres des muscles rouges sont richement capillarisées et possèdent beaucoup de mitochondries et de vésicules lipidiques. Les teneurs en glycogène, en myoglobine et en cytochromes sont aussi élevées.

Les fibres des muscles blancs constituent l'essentiel des muscles squelettiques chez les poissons (jamais moins de 70%). Ils sont utilisés pour la nage rapide. Lors de la nage à vitesse intermédiaire, les deux types de fibres musculaires entrent en jeu. Les fibres blanches forment un réseau dense et serré dont les myofibrilles occupent entre 75 et 95% du volume des fibres. Il y a peu de mitochondries, de vésicules lipidiques, de myoglobine et la vascularisation est pauvre. L'énergie vient essentiellement de l'utilisation anaérobie du glycogène intramusculaire avec utilisation d'un peu de phosphocréatine et d'ATP (Bjornevik, (2003)).

Dans le muscle blanc, les phospholipides sont stockés dans de petites formations de tissu adipeux insérées entre les feuillettes musculaires alors que dans le muscle brun, ils sont également stockés au sein même des fibres.

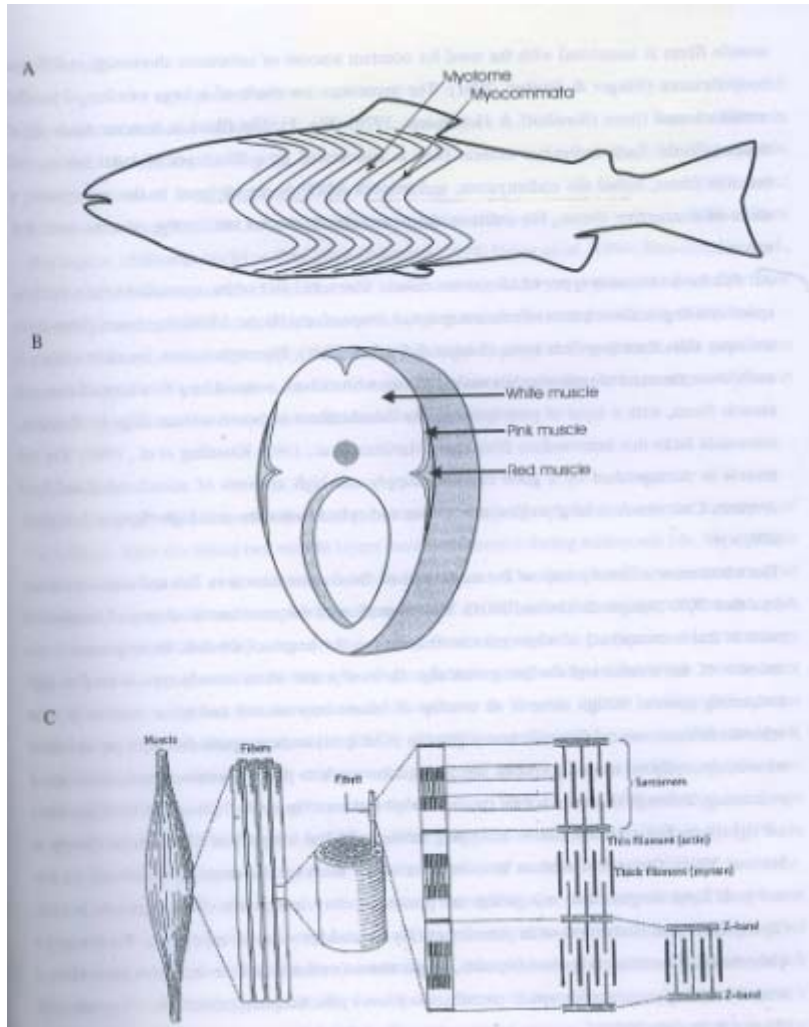


Figure 20 : Structure musculaire des saumons, d'après Bjornevik (2003).

- A) représentation schématique des muscles chez un poisson.
- B) Section transversale d'un muscle de poisson
- C) Représentation schématique de l'arrangement moléculaire d'un muscle strié de mammifère, également valable pour le saumon.

Traduction :

- Myotome = myotome ou myomères
- Mycommata = myoseptes
- White muscle= muscle
- Red muscle = muscle brun
- Fibers= fibres
- Fibril= fibrilles
- Sarcomers= sarcomères
- Thin filament= filament fin d'actine
- Thick filament= filaments de myosine

La mobilisation des lipides est contrôlée par une triacylglycérol lipase (TAG) hormono-dépendante. Les acides gras libérés sont ensuite oxydés par β -oxydation dans les mitochondries et les peroxysomes. La TAG lipase hépatique serait stimulée par la glucagon et les catécholamines, alors que la TAG lipase du tissu adipeux semble influencée par les hormones thyroïdiennes. En hiver et lors du développement des gonades, les poissons arrêtent de s'alimenter et mobilisent activement leurs réserves lipidiques.

Les lipides sont avant tout une source majeure d'énergie : 1g de lipides apporte de 35 à 40 kJ, soit en moyenne deux fois plus que les glucides et les protéines. Au-delà de la couverture du besoin énergétique, la ration doit apporter un pool d'acides gras dits essentiels car l'organisme du poisson ne peut les synthétiser alors qu'il en a besoin pour sa constitution et son métabolisme.

b) Besoins en acides gras essentiels

La synthèse des acides gras est majoritairement réalisée dans le foie par le complexe enzymatique acide gras synthétase. Deux acides gras ne peuvent être synthétisés *de novo* par les poissons : l'acide linoléique (C18:2,n-6) et l'acide linoléique (C18:3,n-3). Ces deux AGPI sont essentiels, ils doivent être apportés par l'alimentation.

Les saumons sont capables de bioconversion des acides gras par élongation ou par désaturation. Les acides gras mono insaturés sont synthétisés grâce à la $\Delta 9$ désaturase, les AGPI à l'aide des $\Delta 6$, 5 et 4 désaturases. L'affinité de ces enzymes pour les acides gras est décroissante des acides gras de la série oméga 3 à oméga 9. Les acides gras polyinsaturés à longue chaîne exercent également un effet de rétrocontrôle négatif sur la $\Delta 6$ désaturase. L'apparition dans le foie d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne de la série n-9 constitue un critère de carence : elle se produit lors d'un déficit en acide linoléique et/ou linoléique. L'activité des $\Delta 5$ et 4 désaturases est faible chez les poissons marins.

❖ Rôles des acides gras essentiels

Les **acides gras essentiels** ont les fonctions suivantes :

- un rôle constitutif, en tant que composants des phospholipides des membranes cellulaires et des lipoprotéines de transport,
- ce sont les précurseurs de la synthèse des prostaglandines des séries 1 et 2, des leucotriènes et tromboxanes. Ces composés agissent sur l'excrétion rénale et branchiale, sur l'osmorégulation et les systèmes : nerveux, circulatoire, digestif et reproducteur.
- ils ont un rôle de second messenger, en particulier l'acide arachidonique (C 20:4 n-6), qui est un régulateur de la multiplication cellulaire.

❖ Besoins en acides gras essentiels

Chez les poissons d'eau froide, les besoins en acides gras essentiels de la série n-3 sont supérieurs à ceux de la série n-6. Les acides gras les plus importants sont l'acide éicosapentaénoïque (20 :5 n-3 ou EPA), docosahexaénoïque (22 :6 n-3 DHA) et arachidonique (20 :4 n-6).

Chez le saumon, les besoins estimés (rapportés en % de l'aliment) en AGE sont de 1% d'acide linoléique pour la série n-6, et de 1 à 2,5% d'acide linoléique pour la série n-3 (d'après Pennel, (1996)). Dans la nature, l'EPA et le DHA sont apportés presque exclusivement par les poissons gras (à l'exception près de quelques algues unicellulaires et quelques plantes). Une huile de poisson contient en moyenne 180 mg d'EPA et 120 mg de DHA par gramme. Le « saumon idéal » est constitué d'un ratio EPA/DHA entre 1 et 1,5.

Les **régimes déficients en AGE** sont accompagnés d'une dégénérescence hépatique avec accumulation de lipides, d'une érosion des nageoires, de lésions branchiales et d'une diminution du taux d'hémoglobine. Enfin, la tolérance aux stress est diminuée. **Les besoins en AGE** doivent être exprimés en pourcentage des lipides car de fortes teneurs en lipides augmentent le besoin en AGE. Les besoins sont le plus souvent couverts par la présence dans l'aliment d'huiles de poisson (apportant de l'EPA et du DHA) et des farines de poisson qui apportent également des lipides. Les proportions en acides gras dans l'aliment sont importantes car elles influencent l'efficacité relative des différents acides gras et modifient le profil en acides gras de la chair des poissons.

❖ Métabolisme

Menoyo *et al.*, 2003, ont mesuré les effets de quatre aliments avec des teneurs variables en acides gras. Des poissons de 1,8 kg ont été nourris deux fois par jour *ad libitum* avec des aliments contenant des teneurs variables en oméga 3 et en acides gras saturés (tableau 7, partie II-E a).

Les résultats de cette expérience ont mis en avant les effets de la composition de l'aliment sur la croissance. La croissance est plus rapide lorsque la ration contient peu d'oméga 3 (20% d'AGPI dont 15% d'oméga 3) et l'index hépatosomatique (ou HSI)* est réduit. La teneur en acides gras saturés modifie la proportion de viscères (exprimée sous forme d'index viscérosomatique*). Lorsque la ration contient peu d'acides gras saturés, l'index viscérosomatique est faible. Cet index est corrélé au rendement à éviscération.

La composition des filets en lipides neutres* reflète celle de l'aliment. En ce qui concerne les lipides polaires, les différences sont plus mitigées : la teneur musculaire en acides gras saturés ne varie pas sauf la concentration en C18:0 qui dépend de la teneur en oméga 3 dans la ration. De même, la teneur musculaire en acides gras monoinsaturés est supérieure dans une ration contenant peu d'oméga 3. La teneur musculaire en AGPI est plus élevée chez les poissons recevant un aliment riche en oméga 3.

Le ratio oméga 3/6 est plus élevé chez les saumons recevant peu d'acides gras oméga 3 et peu d'acides gras saturés. La digestibilité globale des acides gras est ici optimum dans cette expérience, car l'aliment était composé exclusivement d'huile de poissons (à digestibilité élevée). De plus, l'activité des enzymes est améliorée lorsque la ration contient peu d'AGPI, et peu d'AGS sauf pour le C14:0. Quand l'aliment contient plus d'AGMI, l'activité d'une enzyme lipogénique : et d'une enzyme lipolytique augmentent (respectivement l'enzyme malique hépatique et la L-3-hydroxyacyl-CoA-deshydrogénase, enzyme cardiaque mitochondriale).

Ces résultats montrent que la digestibilité des acides gras saturés est affectée par :

- **la teneur de la ration en AG saturés,**
- **la teneur de la ration en AG oméga 3,**
- **un effet combiné entre les AG saturés et les oméga 3.**

La digestibilité des AGMI et des AGPI est affectée par les acides gras saturés. Chez les poissons, la digestion et l'absorption des acides gras saturés et monoinsaturés est inférieure à celle des acides gras polyinsaturés.

Les voies métaboliques de la lipogénèse et de la lipolyse des poissons sont identiques à celles des mammifères. La composition de la membrane en acides gras est modifiée en fonction de la production de triglycérides par la cellule. Les poissons d'eau douce régulent leur composition en acides gras en équilibrant l'incorporation des acides gras alimentaires assimilés et des acides gras formés de manière endogène. Le métabolisme des lipides est influencé par les acides gras alimentaires, en fonction du degré de saturation et de la longueur des chaînes.

La néosynthèse d'acides gras est affectée par la présence d'acides gras saturés et d'oméga 3 dans l'alimentation. La mauvaise digestibilité des acides palmitique et stéarique permet de comprendre l'impact négatif de la présence de ces acides gras sur la digestibilité des lipides. Les performances de croissance sont supérieures pour des poissons nourris avec un aliment contenant peu d'AG de la série oméga 3 et beaucoup d'acides gras monoinsaturés.

Une fois absorbés, les acides gras sont utilisés différemment en fonction de leur degré de saturation (Menoyo *et al* (2003)) : soit ils sont oxydés pour produire de l'énergie, soit ils sont incorporés dans des phospholipides de structure, soit ils sont stockés comme réserves énergétiques.

c) Influence des lipides alimentaires sur la composition corporelle et la qualité des poissons

Les performances de croissance, l'index hépatosomatique et la teneur en lipides des filets sont principalement influencés par la teneur en oméga 3 de la ration. Le niveau en acides gras saturés de la ration modifie les rendements.

❖ Effet de la teneur en lipides

Les aliments riches en lipides distribués à satiété induisent des modifications de la composition corporelle des poissons : les dépôts lipidiques augmentent et, à l'inverse, la teneur en eau diminue. Le dépôt de protéines reste constant. Les dépôts de lipides périviscéraux sont ceux qui augmentent le plus. L'engraissement du foie en cas de surconsommation d'énergie peut aboutir à une stéatose. L'engraissement affecte différemment les familles de lipides : les phospholipides sont inchangés, les TAG sont plus soumis à variation.

De façon à éviter un engraissement excessif, la composition de l'aliment doit être finement gérée.

Les muscles des saumons et leurs attaches sont entourées d'adipocytes. Les sites les plus riches en adipocytes sont le gras sous-cutané, les belly-flaps et les myoseptes. Ils peuvent contenir jusqu'à 70% de lipides, majoritairement sous forme de triacylglycérol (Refstie *et al* (2000)).

❖ Effet de la composition en acides gras

La composition de l'aliment en acides gras n'a presque pas de répercussion sur l'engraissement du poisson. Le 3-thio acide gras, l'acide tétradécylthioacétique (TTA), augmente l'oxydation mitochondriale hépatique et musculaire et permet la réduction de la teneur corporelle en matières grasses, chez le rat. Le TTA est un acide gras saturé à 16 atomes de carbone modifié par un atome de soufre. La position du soufre sur le troisième atome de carbone suggère que cet acide gras ne peut être oxydé par β -oxydation.

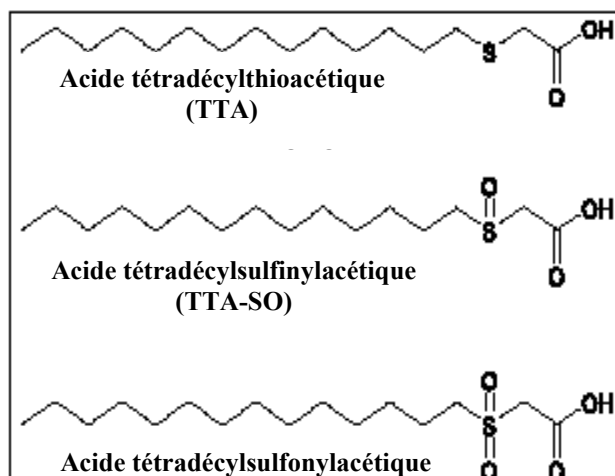


Figure 21 : Noms, structure et abréviations des analogues des acides gras sulfo-substitués et de leurs métabolites. d'après Moya-Falcon *et al* (2004).

La teneur en lipides des poissons nourris avec un complément de TTA (0,3 et 0,6% de la composition de l'aliment) étaient plus faibles. Cela résulte probablement de l'effet combiné de l'augmentation de capacité de la β -oxydation mitochondriale des autres AG (surtout C20:5,n-3), du taux de croissance inférieur, et d'une consommation plus basse d'aliment.

Les acides gras polyinsaturés servent au maintien de la fluidité membranaire et interagissent avec les enzymes liés à la membrane. Tout comme les acides gras saturés qui, à des teneurs croissantes, diminuent l'activité de la pompe $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{ATPase}$, on pense que les AGPI sont un des éléments clefs de l'adaptation de l'activité de la pompe $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{ATPase}$ des branchies aux basses températures. Bien que les différents teneurs en TTA dans l'alimentation diminuent les pourcentages en acides gras saturés et augmentent les n-3 dans le cœur et les branchies, l'activité des enzymes liées aux membranes des branchies n'a pas changé.

L'alimentation modifie les profils en acides gras dans la chair et agit sur le métabolisme des poissons : plus les apports lipidiques sont élevés, plus la biosynthèse endogène des acides gras est réprimée. Les poissons nourris avec des aliments contenant des huiles végétales (riches en n-6) ont des teneurs en n-6 plus élevées que les poissons sauvages et que ceux nourris avec un aliment marin. Les réactions d'élongation et de désaturation permettent de modifier l'équilibre initial des apports alimentaires.

❖ Paramètres de mesure sur les poissons

La **conformation** des poissons est évaluée par le biais du facteur de condition (facteur k). Il conditionne le rendement à abattage. Un engraissement excessif conduit à une augmentation des dépôts de gras viscéraux et hépatiques qui sont des portions retirées lors de l'éviscération. Le rapport poids éviscéré/poids vif diminue donc.

La **teneur en lipides** de la chair modifie aussi la perception organoleptique : en particulier la tendreté, la qualité visuelle des filets (qui est parasitée par l'épaisseur des bandes blanches) et le goût. Des teneurs en lipides importantes sont préjudiciables au salage et au fumage car elles sont à l'origine de pertes d'eau et d'huile lors du process. La nature et l'origine végétale ou marine des lipides présents modifie la résistance des filets au rancissement et le goût des filets.

La **qualité nutritionnelle** de la chair dépend de la teneur en matières grasses du produit fini. La partie consommée est principalement le filet dont la teneur en matières grasses est directement corrélée au niveau d'engraissement du poisson. L'origine et la nature des huiles, matières premières de l'aliment, joue sur la présence des acides gras polyinsaturés à longue chaîne de la série oméga 3 favorables à la santé humaine dans l'aliment et par voie de conséquence dans la chair du poisson.

❖ Limites

Les acides gras insaturés sont particulièrement sensibles à l'oxygène qui permet leur dégradation par **réaction de peroxydation**. Cette réaction conduit à la formation de radicaux libres qui sont très nocifs pour les organites cellulaires et les macromolécules. La peroxydation des lipides est responsable de réactions en chaîne qui peuvent détruire les éléments labiles (vitamines A et E, riboflavine, acide folique...) à la fois dans l'aliment et dans la chair du poisson. Le fonctionnement de certaines enzymes peut être altéré par cette peroxydation des lipides et par voie de conséquence la digestion. Les composés terminaux de la réaction de peroxydation sont des composés stables mais connus pour leur toxicité : A titre d'exemple le malonaldéhyde serait cancérigène.

L'organisme des poissons se protège par le piégeage des radicaux libres par des antioxydants (vitamines A, C et E) et par un système enzymatique détruisant les composés intermédiaires (superoxyde dismutase et glutathion peroxydase). La **prévention** des réactions d'oxydation passe par l'adjonction d'antioxydants de synthèse, de vitamine C et de vitamine E dans les aliments afin de couvrir les besoins élevés des poissons et de permettre une bonne conservation de leurs productions. Lors de la conservation de la chair, la dégradation des acides gras et des pigments est accélérée : l'intensité de la couleur diminue et une odeur de rance apparaît.

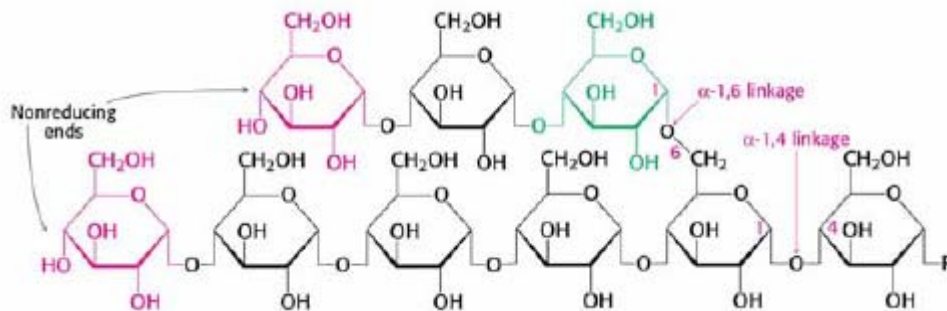
F. Nutrition glucidique : intérêts et limites des apports glucidiques

a) Digestion – digestibilité

Les glucides sont aussi appelés hydrates de carbone. Leur formule correspond presque toujours à la formule $(CH_2O)_n$. Ce sont des polyalcools avec un nombre variable de fonctions aldéhyde ou cétone. On distingue :

- les sucres simples,
- les oligosaccharides (2 à 10 molécules d'oses),
- les polysaccharides (polymères à chaîne linéaire ou ramifiée tels que l'amidon ou le glycogène dont la formule est représentée ci-dessous). Quand l'aliment contient des polysaccharides tels que de l'amidon traité issu de blé (à raison de 10% de la ration), la croissance et l'indice de consommation des saumons sont améliorés (d'après Hemre *et al* (1995)).

Figure 22 : représentation de la structure chimique de base des polysaccharides (Source Inc).



Seuls les hexoses, les disaccharides et quelques homopolysaccharides sont utilisables dans l'alimentation des poissons. Quelques glucides jouent un rôle nutritionnel secondaire voire négatif comme les glucides fermentescibles et les fibres.

L'amidon (homopolysaccharide possédant des liaisons α 1-4 et α 1-6) est hydrolysé en maltose par l' α -amylase, puis ses résidus le sont par la maltase et des isoenzymes. Dans les cellules animales, les glucides sont stockés sous forme de glycogène. Les fibres possèdent plus de liaisons de type β (par exemple β 1-4 pour la cellulose). Dans le milieu aquatique, les végétaux sont principalement représentés par des algues. Les algues dites « laminaires » ont la particularité d'être constituées de fibres dont les liaisons sont en β 1-3 qui ne peuvent donc être utilisées que par des enzymes spécialisées, des « laminariases ».

Dans le milieu aquatique, les glucides sont une source peu présente (mis à part la chitine des crustacés). Du fait de cette rareté, les poissons sont peu adaptés à valoriser les glucides alimentaires. La digestibilité des glucides complexes est faible chez les poissons. Au-delà d'un certain seuil d'incorporation, des phénomènes d'intolérance apparaissent. Cependant, l'apport de glucides dans la ration favorise la croissance et l'utilisation des protéines.

On ne connaît pas précisément le besoin en glucides des poissons. Des poissons nourris avec un aliment totalement sans glucide présentent un retard de croissance. Les apports optimaux pour les saumons et d'autres poissons carnivores sont situés entre 7 et 20%. Chez le saumon, la croissance et la digestibilité globale de la ration sont altérées lorsque les teneurs en amidon excèdent 10% (Vangen et Gro-Ingunn (2003)).

La **digestibilité des glucides** est liée à la complexité de la molécule. Plus la molécule est petite, plus l'efficacité de la digestion augmente. De même, pour l'amidon, plus il existe des ramifications (teneur en amylopectine), plus les enzymes ont de mal à atteindre leur site d'action. Un traitement thermique (cuisson, floconnage...) améliore la digestibilité des glucides complexes. Un taux de gélatinisation supérieur à 70% semble nécessaire pour que la digestibilité des amidons soit maximale. De telles sources glucidiques peuvent alors contribuer à l'épargne protéique (cf. paragraphe II F b). D'autres facteurs modifient la digestibilité : chez le saumon, la digestibilité de l'amidon change avec la salinité (diminue en eau salée) et avec la teneur en glucides (passe de 92 à 77% quand la teneur en glucides augmente de 7% à 23%, cf. figure 23, d'après Krogdahl *et al* (2004)).

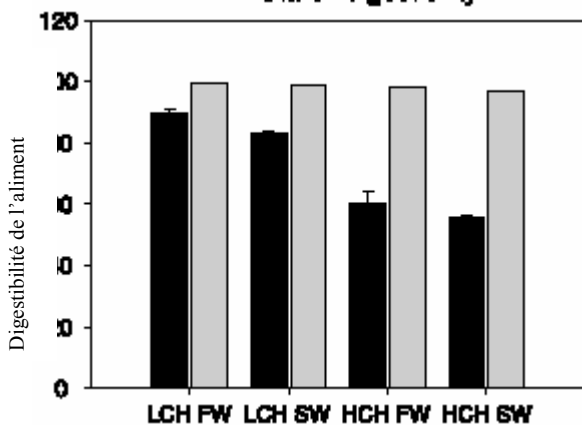


Figure 23 : Digestibilité de l'amidon chez le saumon (en noir) et la truite (en gris) nourris avec un aliment pauvre en amidon (LCH) :7% ou riche en amidon (HCH), en eau douce (FW) ou en eau de mer (SW). La truite digère la plupart des nutriments, et en particulier l'amidon, mieux que le saumon. Les saumons sont également plus sensibles aux variations de teneur en amidon dans l'aliment que les truites. Pour les saumons en eau douce, la digestibilité de l'amidon était meilleure, celle des lipides inférieure (résultats non présentés). D'après Krogdahl *et al* (2004).

La salinité modifie le transport des nutriments chez les salmonidés. La cinétique de transport du glucose dans l'intestin proximal est diminuée et saturée dès 1 mmol de D-glucose /l en mer, alors qu'en eau douce, les taux de transport sont plus élevés et non saturables. Ces constatations permettent d'expliquer que la digestibilité des glucides par les salmonidés est supérieure en eau douce (Nordrum *et al* (2000)).

Les transporteurs intestinaux, particulièrement ceux couplés au sodium semblent jouer un rôle dans l'osmorégulation. Le transporteur Na^+ /glucose transfère également de l'eau (260 molécules d'eau sont co-transportées lors de l'entrée d'une molécule de glucose). L'eau de mer est un milieu hypertonique où l'organisme a tendance à se déshydrater. Les apports d'eau sont donc essentiels. Les flux de glucides sont accompagnés de l'entrée passive d'eau en tant que « solvant » suivant les mouvements des molécules, et de l'entrée active d'eau avec les transporteurs au sodium. Tant que le gradient de sodium est maintenu, ces échanges se font sans coût énergétique (Nordrum *et al* (2000)).

Les espèces carnivores semblent mal s'adapter à l'augmentation de l'incorporation de glucides dans l'aliment. Cependant, dans l'étude de Krogdahl (2004), l'amidon, apporté via des aliments riches en amidon et pauvres en protéines, a eu un effet stimulant sur l'activité de la maltase, de la sucrase et de la lactase chez la truite et chez le saumon.

b) Métabolisme du glucose

Même lorsque les poissons digèrent les glucides, l'utilisation métabolique de glucose peut être faible. Au-delà de 20% d'incorporation, on trouve des phénomènes **d'intolérance**.

❖ Régulation de la glycémie

La glycémie des poissons, après un repas riche en glucides (28%) reste très élevée (pic jusqu'à 17 mmol/L) pendant longtemps (parfois plus de 24h) (cf. figure 24, d'après Del Sol Nova (2004)).

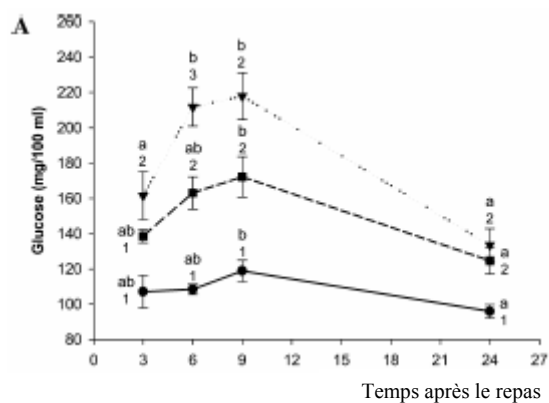


Figure 24 : Niveaux plasmatiques en glucose chez la truite adaptée à différents aliments. Des lettres différentes indiquent des différences statistiquement significatives entre les moments d'échantillonnage (3,6, 9 et 24 h après le repas) au sein d'un même groupe. Des nombres différents indiquent des différences significatives entre groupes au sein d'un même moment d'échantillonnage. ▼ aliment à 28% d'amidon, issu de blé, ■ aliment à 28% d'amidon issu à 60% de blé extrudé et à 40% d'amidon gélatinisé, ● aliment témoin à 12% de glucides. D'après Del Sol Nova (2004)

La glycémie est mal contrôlée chez les poissons. Les poissons sécrètent de l'insuline, du glucagon comme chez les mammifères. Ils possèdent également des récepteurs dans beaucoup de tissus. Cependant, l'ingestion de grandes quantités de glucides digestibles induit un dysfonctionnement hépatique associé à une hépatomégalie et à d'autres effets sur les métabolismes lipidique et glucidique.

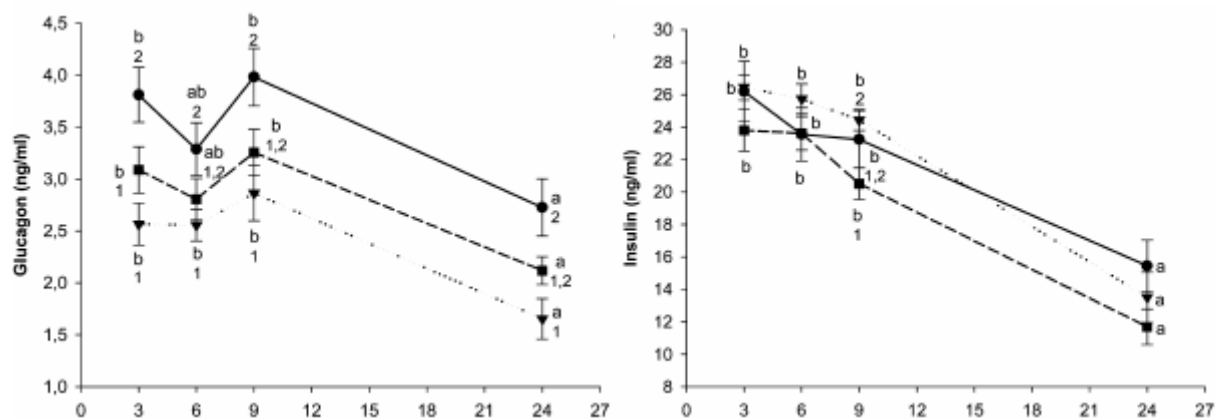


Figure 25 : d'après Del Sol Nova M., 2004⁴⁷. Niveaux plasmatiques en insuline et glucagon chez la truite adaptée à différents aliments. Des lettres différentes indiquent des différences statistiquement significatives entre les moments d'échantillonnage (3,6, 9 et 24 h après le repas) au sein d'un même groupe. Des nombres différents indiquent des différences significatives entre groupes au sein d'un même moment d'échantillonnage. ▼ aliment à 28% d'amidon, issu de blé, ■ aliment à 28% d'amidon issu à 60% de blé extrudé et à 40% d'amidon gélatinisé, ● aliment témoin à 12% de glucides.

Après une période d'adaptation à l'aliment, la glycémie post-prandiale reflète la teneur en glucides de l'aliment. Les profils post-prandiaux de glucagon sont inversement proportionnels à ceux de la glycémie (les poissons dont la glycémie est la plus élevée ont la teneur en glucagon la plus basse), indiquant que l'ingestion de glucose inhibe la sécrétion du glucagon. La sécrétion d'insuline est élevée dans la période de 3 à 9 h suivant le repas. Les teneurs en insuline n'étaient pas différentes entre les groupes.

L'absence de différences entre groupes indique que le glucose, bien qu'il stimule la sécrétion d'insuline n'est pas le principal facteur de contrôle de la sécrétion d'insuline. En effet, chez les poissons, les cellules pancréatiques productrices de somatostatine (qui inhibent la production d'insuline) sont très sensibles au glucose, les cellules *beta* répondent donc

faiblement. De plus, certains peptides, tels que le Glucagon-like peptide, n'ont pas d'effet stimulateur sur la sécrétion d'insuline en présence de glucose. Tous ces phénomènes permettent d'expliquer la faible réponse de l'insuline à des teneurs variables en glucose.

La régulation de la sécrétion de glucagon semble relativement indépendante de l'insuline, et la faible tolérance des poissons au glucose ne peut être expliquée par un manque d'inhibition au glucagon par les glucides. L'élévation du glucagon entre 9 et 11h après le repas est conjointe du pic plasmatique en acides aminés. La tolérance aux glucides dépend donc de la teneur de l'aliment en protéines et en glucides. Des études *in vitro* ont montré que certains acides aminés sont plus puissants pour contrôler la synthèse d'insuline que le glucose (Del Sol Nova *et al* (2004)).

❖ Métabolisme du glucose

La **phosphorylation du glucose**, première étape de l'utilisation du glucose est réalisée par des hexokinases. L'activité de ces enzymes est faible et limite la capacité de phosphorylation du glucose. Elle est supérieure dans le muscle rouge, le cerveau ou le tissu cardiaque. L'activité de ces enzymes peut être induite avec l'insuline ou par une alimentation riche en glucides.

La **glycolyse** est la voie principale du catabolisme du glucose. Elle transforme le glucose en pyruvate et produit de l'ATP et des substrats oxydables. Dans le muscle blanc, elle permet la production de lactate, témoin de conditions anaérobies. Dans le foie, elle permet la fourniture de précurseurs pour la biosynthèse. Les réactions sont toutes réversibles sauf celles catalysées par l'hexokinase, la phosphofructokinase et la pyruvate kinase qui sont des étapes limitantes.

Le pyruvate est converti en lactate et génère du NAD^+ grâce à l'action de la lactate déshydrogénase (LDH). L'activité maximale de cette enzyme est obtenue à une température inférieure à celle de l'enzyme des mammifères. Le pyruvate, par décarboxylation, conduit à la formation d'acétyl-CoA. L'activité de la LDH est régulée par la teneur en ATP mitochondrial.

La **voie des pentoses phosphate** permet la genèse de NADPH, transporteur d'énergie au pouvoir réducteur puissant. Cette voie a lieu dans le foie et est influencée par la température. La dégradation du glucose en glucuronate permet la formation de glucuronyl utilisé lors des réactions de détoxification.

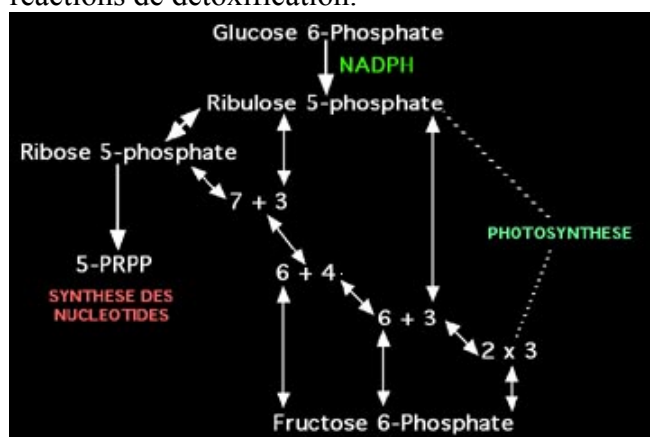


Figure 26 : Représentation simplifiée de la voie des pentoses avec les principaux métabolites et le nombre d'atomes de carbone des molécules néoformées. (Source Inc.)

Le turn-over du glucose est faible. La glycogénogenèse et la néoglucogénèse se produisent principalement dans le foie, les muscles et le rein. Les acides aminés, et plus particulièrement les acides aminés glucoformateurs (alanine, sérine ou glycine), sont les substrats de choix.

Ceux provenant de la dégradation des protéines corporelles y participent de manière intense chez les poissons. De fortes teneurs alimentaires en protéines augmentent l'activité des enzymes de la néoglucogénèse.

❖ Le glycogène

Les réserves en glycogène sont principalement situées dans le cerveau, le foie (1 à 12% du tissu frais) et le muscle rouge. La teneur hépatique en glycogène est étroitement corrélée à l'ingestion de glucides. Bien que les poissons carnivores aient une capacité limitée à digérer et utiliser l'amidon de l'aliment, les aliments riches en glucides ont pour conséquence d'élever la teneur du foie en glycogène.

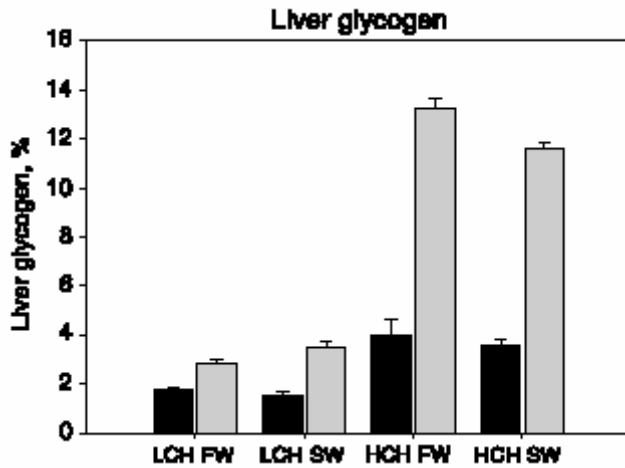


Figure 27 : Teneur en glycogène du foie de saumons (en noir) et de truites (en gris) élevés en eau douce (FW) ou salée (SW) et nourris avec un aliment à 23% de glucides (HCH,) ou à 7% de glucides (LCH). D'après Krogdahl *et al* (2004)

Les truites ont des teneurs en glycogène et un index hépatosomatique (rapport taille du foie/ taille du corps) plus élevés que les saumons. Chez les deux espèces, les teneurs en glycogène hépatique sont supérieures lorsque les poissons consomment un aliment riche en glucides. Chez la truite, l'index hépatosomatique augmente également, contrairement au saumon chez qui la taille du foie ne change pas (non représenté)

La dégradation du glycogène est permise par l'action de la glycogène phosphorylase du muscle et du foie. Le glycogène est mobilisé lors d'exercice et/ou de stress intense. Même après de longues périodes de jeûne, les réserves en glycogène sont peu diminuées. En effet, lors d'un jeûne prolongé, l'activité métabolique est réduite ce qui diminue le niveau de consommation des glucides et la néoglucogénèse est activée de manière à reformer du glucose à partir de pyruvate. Ces deux mécanismes protègent les poissons d'une hypoglycémie.

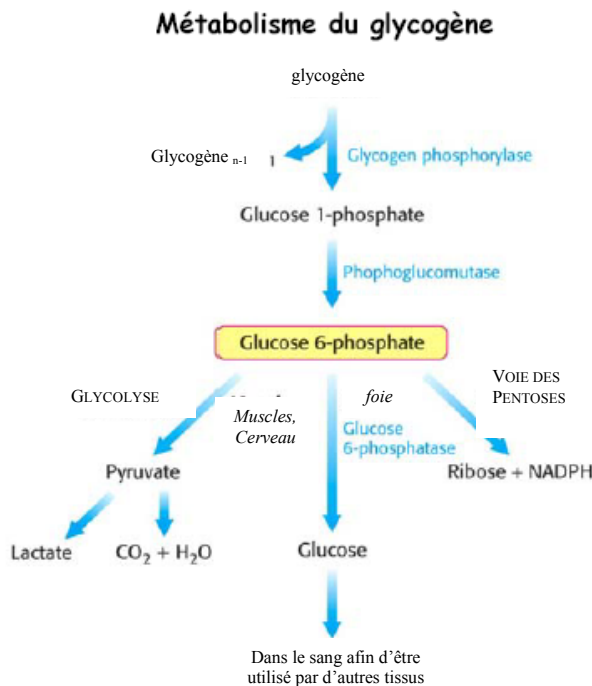


Figure 28 : d'après R.Bossi, université de Marseille LBTE.

Le glycogène est un pourvoyeur de glucides qui pourront être par la suite utilisés (sous forme de glucose-6-P) dans la glycolyse, dans la voie des pentoses ou pour le maintien de la glycémie plasmatique.

❖ Les fibres

Les fibres comprennent essentiellement des polysaccharides d'origine végétale terrestre ou marine plus ou moins complexes, non hydrolysables, présentant une structure fibreuse. Elles sont partiellement digérées sous l'action cumulée de l'acide chlorhydrique de l'estomac et des enzymes des bactéries de la flore intestinale. La digestibilité des polysides d'origine aquatique (alginates et carraghénanes) est presque nulle.

Si les repas sont fractionnés au cours d'une journée, l'utilisation des glucides est donc améliorée. Les composés qui donnent des gels (gommes, pectines) ont tendance à retarder la vidange stomacale. Certains liants (alginate, gomme de guar) améliorent la consistance des fèces jusqu'à une limite d'incorporation de 4 à 5%. La carboxyméthylcellulose présente des propriétés gélifiantes qui limitent l'hyperglycémie post-prandiale chez les poissons.

❖ Interactions des glucides avec les acides gras et protéines

L'enzyme malique, le glucose 6-phosphate déshydrogénase et la 6-phosphogluconate déshydrogénase régénèrent toutes les trois le NADPH qui est utilisé dans la biosynthèse des acides gras et des stérols, dans la voie des pentoses qui est une voie annexe de glycolyse. Leur activation, grâce à l'effet inducteur d'une administration de glucose ou d'alanine, nécessite 24h. L'activité de la G6PDH est multipliée par 6 lorsque les apports en glucides passent de 5,5mmol/l à 10mmol/l.

Lorsque les apports alimentaires en acides gras sont suffisants, la biosynthèse *de novo* d'acides gras est réduite. De même, l'apport de glucides stimule la sécrétion d'enzymes lipogéniques, l'expression du gène de la glucokinase ainsi que l'activité de la glucokinase. La concentration en cette enzyme s'adapte aux apports alimentaires en glucides et est soumise à une régulation positive par l'insuline et négative par le glucagon (Refstie *et al* (2000)).

Une étude de Hemre (1995) a montré que des saumons nourris avec un aliment contenant 31% de glucides avaient des teneur en lipides corporels nettement augmentées. Comme la teneur en lipides des deux aliments de l'étude était la même, l'élévation de la teneur en graisse corporelle provenait d'une synthèse *de novo* d'acides gras. Les éléments nécessaires à cette réduction étaient vraisemblablement apportés par la voie des pentoses. *In vivo*, les protéines et les glucides interagissent et permettent ainsi une « économie » **des protéines**.

G. Vitamines

Les **vitamines** sont des composés nécessaires à la vie, non synthétisés dans l'organisme et de nature différente des acides aminés et acides gras essentiels. Ce sont des composés catalytiques nécessaires en quantité infime. On peut y intégrer deux quasi-vitamines : la choline et l'inositol.

Chez les poissons, la flore intestinale peut parfois participer à la fourniture de vitamines telles que la vitamine K et les vitamines du groupe B. En élevage, les carences en vitamines sont liées à des conditions inadaptées lors de la conservation des aliments (chaleur, humidité, éclairage, pH). On peut citer les conditions auxquelles sont sensibles quelques vitamines : le rétinol est sensible à l'oxydation, la riboflavine (vitamine B2) à la lumière, l'acide ascorbique au pH alcalin, le tocophérol (vitamine E) à la chaleur et aux UV.

La **biodisponibilité** des vitamines peut être altérée par l'action d'enzymes de dégradation (par exemple, la thiaminase est une enzyme qui détruit la vitamine B1, qui se trouve dans le poisson cru et est détruite par la cuisson), de substances bloquant leur absorption intestinale (antibiotiques) ou d'antagonistes naturels ou chimiques (médicaments tels que le lindane antagoniste de l'inositol).

Les vitamines ont **4 grands types de fonctions** :

- fonction coenzymatique simple (thiamine, pyridoxine, biotine, acide folique et polyglutamates, cobalamines, rétinol) ou de transfert et d'oxydo-réduction (riboflavine, niacine, acide panthoténique et vitamine K),
- transfert de protons ou d'électrons (acide ascorbique, tocophérols),
- fonction pro-hormonale (calciférol),
- protection des membranes (tocophérol...).

Il existe des phénomènes d'interaction entre vitamines appelées vicariances ou effets d'épargne. Les vitamines apportées en excès peuvent avoir des effets néfastes : la ménadione ou vitamine K provoque une coagulation excessive du sang, le rétinol ou vitamine A est responsable d'un ralentissement de la croissance, d'une diminution de l'hématocrite, d'une grave érosion des nageoires anales, caudale, pelvique, d'une scoliose et d'une lordose, d'une élévation de la mortalité. Les seuils de toxicité sont de cinquante fois les besoins pour la vitamine K, et à partir de 2,2 millions d'UI/kg d'aliment.

Les poissons ont des besoins proches des vertébrés supérieurs. Ils sont en plus dépendants de l'apport de choline (comme les oiseaux) et d'inositol (comme les invertébrés).

La **choline** est l'ammonium quaternaire de la triméthylamine, et sa capacité de synthèse est très réduite. Elle intervient dans le transfert de l'influx nerveux via l'acétylcholine, dans la composition des membranes cellulaires et permet l'épargne de méthionine.

L'**inositol** est un constituant des phospholipides, impliqué dans la traduction de signaux par des seconds messagers (phosphatidylinositol).

Les **vitamines E et C** ont un rôle plus important : elles protègent l'organisme de l'oxydation des AGPI durant la vie et en période post-mortem. Elles interviennent avec les enzymes glutathion peroxydase et superoxyde dismutase afin de stopper les peroxydations.

La **vitamine A** est un alcool dérivé des caroténoïdes qui évoque la moitié d'une molécule de β -carotène. Elle peut être synthétisée à partir de β carotène et de la dégradation de certains

caroténoïdes tels que l'astaxanthine. La transformation se produisant molécule à molécule, l'efficacité théorique du β carotène est au maximum de 50% de celle du rétinol. En réalité, elle est inférieure à 20% par rapport au rétinol et la réaction se produit principalement lorsque les poissons sont à des températures plus chaudes. Chez les poissons, on trouve également une forme différente du rétinol vrai (A1), le rétinol A2 qui possède une double liaison supplémentaire dans le noyau β ionone.

D'autres **facteurs pseudo vitaminiques** modifient l'osmorégulation et la perméabilité des membranes, ce qui est important surtout chez les poissons anadromes*. La lécithine en elle-même et grâce à sa teneur en choline est un facteur de croissance. La rutine et l'esculine diminuent la perméabilité des capillaires, augmentent la tonicité de la paroi veineuse, et sont hémostatiques. Ils ont une action antioxydante qui favorise l'action de la vitamine C par inhibition de la cathécol-O-3 méthyl transformase. Ils sont qualifiés de facteurs vitamine P-like.

Les vitamines E, C, K et A sont impliqués dans la respiration, ainsi que le sélénium, le zinc, le cuivre et le sodium. Le rôle exact de ces éléments reste encore à définir (Pennel (1996)).

Tableau 12 : Besoins vitaminiques des salmonidés (d'après Pennel (1996)). Les besoins sont exprimés en mg/kg matière sèche d'aliment. La colonne critère correspond au critère ayant servi à la détermination du besoin.

Vitamine	Espèce	Besoin	Critère	Référence
Thiamine	Saumon du Pacifique	10-15	MLS	Halver 1972
Riboflavine	Saumon du Pacifique	20-25 7	MLS WG, ADS	Halver 1972 Leith <i>et al</i> 1990
pyridoxine	Saumon du pacifique	10-15 6	MLS MG	Halver 1972 Leith <i>et al</i> 1990
	Saumon de l'atlantique	5	MG	Lall and Weerakoon 1990
Acide pantothénique	Saumon du Pacifique	40-50 17	MLS MG	Halver 1972 Leith <i>et al</i> , 1990
Niacine	Saumon du Pacifique	150-200	MLS	Halver 1972
Biotine	Saumon du Pacifique	1-1,5	MLS	Halver 1972
Acide folique	Saumon du Pacifique	6-10 2	MLS MG	Halver 1972 Leith <i>et al</i> 1990
B ₁₂	Saumon du Pacifique	0,015- 0,02	MLS	Halver 1972
Choline	Saumon du Pacifique	600-800	MLS	Halver 1972
Inositol	Saumon du Pacifique	300-400	MLS	Halver 1972
Acide ascorbique	Saumon du pacifique	50	MLS	Halver 1972
	Saumon de l'atlantique	50	MLS	Lall <i>et al</i> 1990
Vitamine A	Saumon du Pacifique	5,9-11	MLS	Storebakken T. 1991
Vitamine D	Saumon du Pacifique		MG	Halver 1972
Vitamine E	Saumon du Pacifique	40-50 mg 30	MLS MG	Halver 1972 Woodall <i>et al</i> , 1964
	Saumon de l'Atlantique	35	MG	Lall <i>et al</i> , 1990
Vitamine K	Saumon du Pacifique			Halver 1972

MLS : stockage hépatique maximal
WG: gain de poids
ADS: absence de signes de déficience
MG : croissance maximale

H. Minéraux

Les poissons ont besoin de minéraux en tant que composés structuraux (squelette) ou fonctionnels (co-facteurs enzymatiques, équilibre ionique, régulation des fonctions endocrines). Les poissons ont la particularité de couvrir une grande partie de leurs besoins en minéraux à partir des ressources minérales contenues dans l'eau, au travers des branchies principalement, du tube digestif et de la peau.

Dans l'intestin, les minéraux peuvent être absorbés par diffusion passive ou par transport actif avec ou sans fixation sur un transporteur spécifique. Les oligoéléments se fixent en général préalablement sur un acide aminé qui sert de ligand. Il existe une homéostasie qui permet d'augmenter l'absorption des minéraux lorsque les minéraux manquent et de les diminuer en cas de léger excès.

L'élimination des minéraux se fait par voie rénale, branchiale, biliaire, fécale et éventuellement épidermique. Les phénomènes de toxicité sont fréquents, les excès pouvant également provenir de l'eau.

En eau douce, le milieu extérieur est fortement hypotonique. Les sels minéraux ont tendance à sortir de l'organisme, le rôle des apports alimentaires est donc essentiel. En mer, le milieu est très hypertonique, les poissons ont tendance à se déshydrater et à absorber massivement les sels. Les poissons doivent donc boire en permanence. Les reins, les branchies et les intestins permettent d'éliminer l'excès d'ions.

Tableau 13 : Synthèse des rôles, besoins, et toxicité des principaux éléments minéraux. (D'après Pennel (1996) et Guillaume *et al* (1999)).

Elément minéral	Rôles	CUD*/ besoin (mg/kg d'aliment)	Toxicité ou carence
Calcium	Dans squelette et écailles, coagulation sanguine, cofacteur enzymatique, sécrétion hormonale. Apporté par farines d'origine animale et par l'eau.		Croissance réduite Mauvais FCR
Phosphore	Squelette, métabolisme énergétique, membranes, cellules et co-enzymes. Apporté par MP* animales et végétales.	Peut être sous forme de phytates indigestibles. 6000	Croissance réduite mauvais FCR, mauvaise minéralisation osseuse Agent polluant.
Potassium	Régulation d'enzymes, osmotique, contraction musculaire et neurotransmission. Apporté par l'eau et les MP végétales	900	
Magnésium	Respiration, co-facteurs enzymatiques. Apporté par l'eau	500	Croissance réduite, anorexie, cataracte dégénérescence des fibres musculaires. Déformations osseuses
Sodium	Equilibre ionique des cellules. Apporté par les MP d'origine animale. Attention aux aliments très purifiés. Supplémentation intéressante en eau douce, avant smoltification	4 à 10% de l'aliment (MS)	
Fer	Dans l'hémoglobine. La régulation de l'absorption du fer est assez imprécise et des apports excessifs en fer contribuent à la formation des « ulcères d'hiver » (ou « wintersore »).	La biodisponibilité du fer est modifiée par la présence d'amidon (Thomassen, 1986). 45	Augmentation de la peroxydation des lipides. Carence : Anémie hypochrome microcytaire. Faible hématoците.

Elément minéral	Rôles	CUD*/ besoin (mg/kg d'aliment)	Toxicité ou carence
Zinc	Co-facteur de nombreux enzymes (SOD).	40	Croissance réduite, déformation (poissons courts et trapus), cataracte
Cuivre	<p>Facilite absorption intestinale d'autres éléments (Fer). Utilisé pour la désinfection sous forme de sulfates.</p> <p>La variation de la cuprémie explique 32% de la variation de dureté du filet. Les niveaux de cuivre du sérum et des muscles sont liés négativement au gaping¹⁰⁷ : Cu sérum et muscles ↓, gaping ↑ Cu sérum ↓, dureté ↑</p> <p>La lysine et les dérivés d'hydroxylysine constituent les liaisons du collagène, et le seul enzyme acteur de ces liaisons est la lysyl oxydase. Il contient un ion cuivre dans son site actif. Une déficience en cuivre bloque la formation d'aldéhydes essentiels à la création de ces liaisons.</p> <p>Chez les mammifères terrestres, une déficience en cuivre est accompagnée des symptômes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - déformation des os - nécrose de tissus - développement anormal de l'élastine - rupture de l'aorte <p>La teneur en cuivre dans le corps varie au cours de la vie d'un animal.</p>	5	Teneur en SOD hépatique diminuée Baisse activité cytochrome C oxydase
Iode	Hormones thyroïdiennes. Protection contre quelques infections bactériennes.	1,1	Hyperplasie de la thyroïde
Sélénium	Protection contre l'auto-oxydation des lipides membranaires. Agit en synergie de la vitamine E.	Fonction et disponibilité selon teneur en vit. C dans la ration 1	Dystrophie musculaire, diathèse exsudative

La biodisponibilité des éléments trace est affectée par la concentration en autres ions polyvalents dans la ration. Des rations riches en calcium réduisent la biodisponibilité du zinc, ce qui est accompagné de forts développements de cataractes chez les poissons nourris avec des farines de poissons blancs riches en sel.

I. Pigments

a) Généralités

Les caroténoïdes sont des pigments liposolubles qui ne peuvent pas être synthétisés par les poissons. Les caroténoïdes majeurs sont le β carotène (β,β - carotène) d'aspect orange, la canthaxanthine (β,β - carotène-4-4'-dione) et l'astaxanthine (3,3'-dihydroxy- β,β - carotène-4-4'-dione) plus roses. L'astaxanthine est le pigment naturel principal des salmonidés et de nombreux crustacés, ces derniers, contrairement aux salmonidés peuvent synthétiser de l'astaxanthine à partir de β carotène. Chez les saumons sauvages, ils sont apportés par les proies naturelles. Chez les saumons d'élevage, ils doivent être apportés dans l'alimentation, afin de produire cette belle couleur rose recherchée par les consommateurs.

Les caroténoïdes sont des substances polyéniques caractérisées par un système de doubles liaisons conjuguées. De nombreuses doubles liaisons rendent ces pigments instables à la chaleur et aux ultraviolets.

Les quantités apportées dans la ration sont soumises à réglementation. La canthaxanthine est interdite dans en Norvège pour le saumon, et limitée en Europe (Directive 2003/7/CE de la Commission du 24 janvier 2003 modifiant les conditions d'autorisation de la canthaxanthine dans l'alimentation des animaux conformément à la directive 70/524/CEE du Conseil) selon :

- Canthaxanthine \leq 80 mg/kg d'aliment
- Astaxanthine \leq 100 mg/ kg
- Mélange des deux \leq 100 mg/ kg

b) Digestibilité et principales sources alimentaires

Les pigments sont liposolubles, leur absorption est donc liée à celle des lipides et leur digestibilité est influencée par la teneur de l'aliment en lipides. L'astaxanthine contenue dans **l'huile de capelin** a une digestibilité plus élevée (85 – 90%) que lorsqu'elle est distribuée via de la farine de crevette (75 – 80%). De même, lorsque les pigments sont dissous dans de **l'acide oléique** plutôt que dans d'autres acides gras, le dépôt dans les muscles augmente.

Les pigments sont issus soit, des matières premières brutes (levures, krill), soit, de dérivés industriels (déchets de crevette) ou soit, de préparations spéciales (farine de crevettes). L'utilisation de ces sources dans les aliments varie en fonction de leur coût, de leur teneur en composés non digestibles (fibres des algues, carbonate de calcium) et en pigments.

Comme les caroténoïdes sont sensibles à l'oxydation, ils sont protégés dans les aliments par enrobage dans de la gélatine ou par micro-dispersion sur support glucidique, et par addition d'antioxydants. La fixation des pigments dans le muscle est d'autant plus élevée que la quantité ingérée augmente (jusqu'à un seuil de 100 mg/kg pour la canthaxanthine) même si leur digestibilité décroît simultanément. L'astaxanthine est mieux absorbée que la canthaxanthine.

Si l'on cesse d'apporter de la canthaxanthine à des truites qui en recevaient jusqu'alors, la pigmentation du poisson est diminuée et ce, surtout chez les truites nourries (vs truites à jeun). Cette observation démontre que la canthaxanthine, bien qu'elle ne puisse être transformée par

la truite, est redistribuée d'un tissu à l'autre. Les caroténoïdes du muscle sont en particulier remobilisés au moment de la maturation sexuelle (vers la peau chez le mâle et vers les ovaires pour les femelles). Une partie est également perdue lors de l'abattage des saumons, au moment de la saignée. En effet, des pigments sont retrouvés dans des prélèvements de sang de saignée, et ce d'autant plus que les poissons sont stressés.

c) Métabolisme

La canthaxanthine synthétique se retrouve dans le sérum dès 3 heures après le repas avec une concentration maximale atteinte 24 heures après l'ingestion. 3 jours après arrêt de la distribution de ces caroténoïdes, leur concentration sanguine commence à diminuer. L'efficacité des caroténoïdes dépend de la disponibilité des caroténoïdes dans les matières premières et leur digestibilité, de leur concentration dans l'aliment, de la durée de l'apport, et de l'appétit de l'organisme à déposer les pigments dans ses tissus.

Au niveau des sites de fixation sur les molécules assurant leur transport sanguin, il y a une compétition entre les caroténoïdes et la vitamine A.

La composition du muscle en isomères d'astaxanthine reflète la composition de l'aliment. Elle est différente entre les poissons sauvages et d'élevage (cf. tableau 11). Les pigments d'origine synthétique sont tous sous forme lévogyre (canthaxanthine et astaxanthine)

Tableau 14 : Principales différences dans la chair de saumons sauvages et de poissons d'élevage. (source site Internet du ministère des finances, rubrique DGCCRF, 2000 et US department of agriculture)

	Saumons sauvages	Saumons d'élevage
Teneur en MG dans la chair	8%	16 à 18%
dont :		
- AG saturés	24	26
- AG monoinsaturés	24	32
- AG polyinsaturés	51	42
- AGPI en g/100g	ou 2,539 g/100g	ou 3,931 g/100g
- AGPI oméga 3 en g/100g	1,723 (68% des AGPI)	1,911 (48% des AGPI)
Ratio (EPA+DHA) / LA	10 à 28	0,7 à 8,4
Isomères d'astaxanthine trans (dans l'astaxanthine de synthèse :		
3S,3S'	26	86
Meso	50	6
3R,3R'	24)	8
		20
Teneur en MG dans la ration	15%	35 à 40%

La forme de stockage est différente en fonction du tissu concerné. Dans la peau des saumons, l'astaxanthine est estérifiée alors que dans les muscles elle n'est pas estérifiée mais liée à des protéines. La concentration en pigments est 10 fois supérieure dans la peau par rapport à la concentration musculaire. Ces pigments permettent de protéger les cellules contre les effets nocifs de la lumière. En particulier, les caroténoïdes contenant au moins 9 doubles liaisons conjuguées semblent capables de modifier ou d'atténuer la lumière.

10% des pigments apportés dans la ration des saumons sont également des précurseurs de la vitamine A. En tant que provitamine A, ils interviennent dans les défenses immunitaires en limitant la formation de radicaux libres et dans les phénomènes physiologiques que sont la croissance et la reproduction.

Cette dernière partie clos donc la présentation des besoins nutritionnels des saumons. Les nourrir implique de couvrir ces besoins en élaborant des aliments complets à partir de diverses

matières premières. Dans cette partie nous aborderons les principales matières premières d'origine marine puis végétale utilisées couramment. Puis nous évoquerons les limites à l'usage de certains composés à cause de facteurs antinutritionnels. Avant de détailler le procédé de fabrication des aliments, nous verrons comment préparer une formulation. Enfin, nous étudierons comment distribuer les aliments au saumons.

III- PRATIQUE DE L'ALIMENTATION DES SAUMONS

A. Matières premières et additifs utilisés dans l'alimentation des saumons

Dans leur milieu de vie naturel, les saumons sont relativement opportunistes. Ils consomment des éphéméroptères, des trichoptères, des chironomidés, des imulidés, des euphausidés, des gammaridés, des décapodes, des clupéidés, des capelans, des petits maquereaux (Pennel *et al.*, (1996)).

Les matières premières d'origine animale sont les ingrédients qui permettent les meilleures performances de croissance chez les espèces carnivores. Elles sont en général intéressantes sur le plan de la digestibilité, du profil en acides aminés essentiels, de l'appétibilité, de leur richesse en vitamines du groupe A et de leur concentration en acides gras essentiels. En général, ces ingrédients ne contiennent pas de composés cellulotiques ni de facteurs antinutritionnels. Ils sont cependant difficiles à conserver car sensibles aux contaminations bactériennes, et à l'oxydation. La qualité de ces produits est assez irrégulière.

Les matières premières d'origine animale les plus utilisées sont les farines et les huiles de poisson. Nous parlerons également des matières premières animales servant de complément ou de substitution. Nous traiterons ensuite des matières premières d'origine végétale, source de protéines ou de matières grasses.

a) Farines et huiles de poisson

Depuis 2002, **les déchets de tous poissons issus de l'aquaculture sont interdits pour l'alimentation des poissons en élevage (CE 1774/2002)**. Ils sont utilisés dans l'alimentation d'animaux terrestres hors ruminants.

Les farines de poissons sauvages sont des sources alimentaires bien adaptées aux saumons. Elles ont une composition en acides aminés en adéquation avec leurs besoins. Les huiles de poissons sont une bonne source d'énergie et d'acides gras poly-insaturés. Farines et huiles apportent également des minéraux, des vitamines et des caroténoïdes.

Les farines de poisson sont utilisées dans l'alimentation des animaux de ferme hors ruminants et de poissons d'élevage. Ce sont ainsi plus de 6 millions de tonnes de protéines de haute qualité qui sont incorporées dans la chaîne alimentaire chaque année. Au cours de la pêche, 22 millions de tonnes de poissons sont rejetées en mer et perdues parce que les poissons sont déjà morts ou blessés de façon irrémédiable. Cela équivaut à 25% de la quantité annuelle de poissons pêchés pour la consommation humaine.

Actuellement, la principale préoccupation des acteurs de la filière est d'utiliser une farine provenant de **ressources durables** et que la pêche minotière n'endommage pas l'environnement marin. La farine est produite principalement à partir de petits poissons pélagiques, souvent pleins d'arrêtes, vivant dans les eaux de surface ou peu profondes, et pour lesquelles la demande des consommateurs est faible ou nulle. Les farines sont également fabriquées avec les déchets de transformation des poissons sauvages qui, faute de ce débouché, seraient nuisibles à l'environnement et/ou traités à la charge du consommateur.

Il est essentiel de s'assurer que les stocks de poissons soient correctement gérés et suivis par un organisme scientifique indépendant, la gestion passant par l'instauration de quotas (TACs) et de mesures de préservation de cette matière première. Les limites de capture sont définies pour toutes les espèces à farine.

La présence de contaminants dans les produits finis va grandissant. Ils proviennent de l'aliment des poissons et ont la propriété de se concentrer tout au long de la chaîne alimentaire. Les principaux polluants incriminés sont les noyaux furanes dont les dioxines, les polychlorobiphényles (PCBs) ainsi que des pesticides comme le DDT et des métaux lourds tels que le mercure. PCBs et dioxines sont des coproduits involontaires formés lors des étapes de combustion. L'exposition humaine aux dioxines et aux PCBs est à 80% d'origine alimentaire.

Les **matières premières** servant à la fabrication de farines et d'huiles dépendent de leur origine géographique (les équivalences en anglais et en latin des noms des poissons sont données en annexe à la fin de la thèse): en Amérique du Sud (Pérou, Chili), trois espèces sont les principaux constituant des farines de poissons. Il s'agit des anchois, du maquereau bleu et de la sardine

En Europe, sept espèces entrent dans la composition de farines et d'huiles. Ces poissons se divisent en trois groupes :

- ceux inutilisables pour la consommation humaine. Il s'agit du lançon, capelan, Tacaud Norvégien
- ceux consommables par l'homme mais principalement utilisés en farine car les débouchés sont limités (Merlan bleu, Sprat)
- les poissons sauvages, utilisés pour la consommation humaine et mais dont les déchets de découpe et les surplus servent à la production de farine (hareng, chinchard).

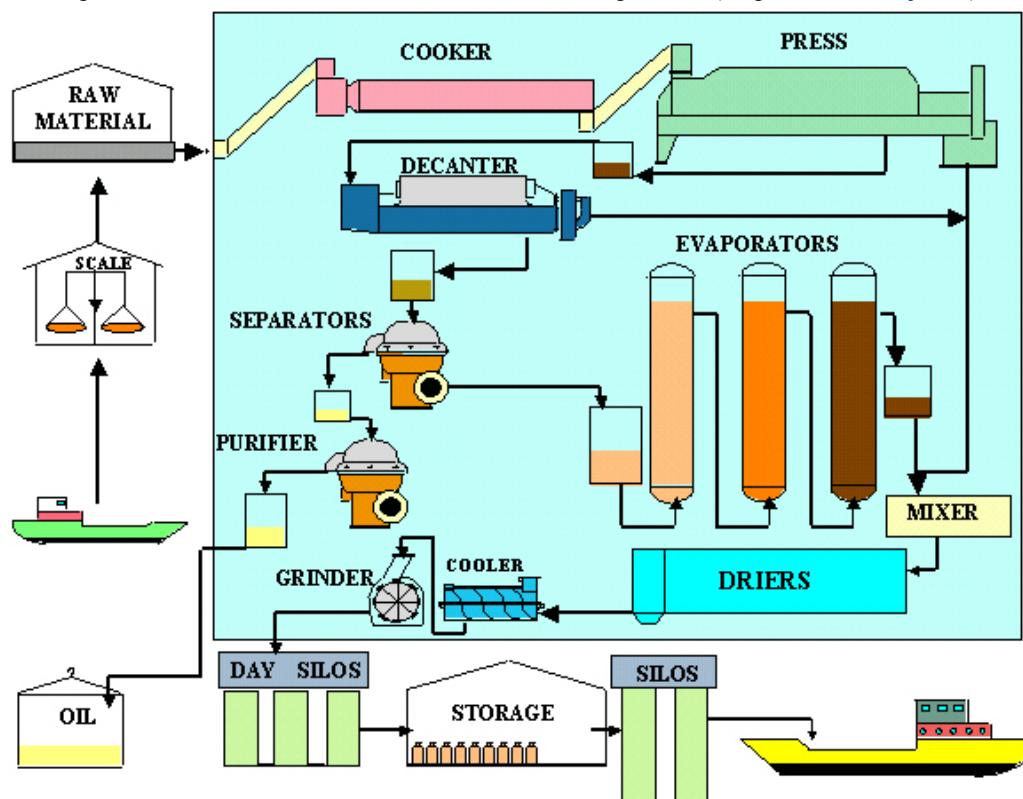
Le Lançon de la mer du Nord jusqu'à hauteur du Golfe de Forth (Ecosse) et de la côte des Orques, est soumis à quota ou TAC (Total Allowable Catch) et à interdiction de pêche durant certaines saisons. Des quotas sont sévèrement appliqués afin de prévenir la surpêche. Les compagnies autorisées à pêcher font l'objet d'une licence. Cette activité de pêche ne peut plus s'exercer quand les stocks sont estimés insuffisants et que les quotas sont dépassés. En effet, un **quota** s'exprime sous la forme d'une quantité totale de capture autorisée. A certaines saisons, la pêche est interdite afin de permettre la reproduction et la reconstitution des stocks ou de ne pas priver certains oiseaux de leur source alimentaire principale.

Le Capelan peuple la mer de Barents, en Islande. Il est pêché de juin à octobre, voire jusqu'en janvier selon l'état des populations.

Le hareng est pêché en automne et au printemps dans la mer du nord, en été et au printemps dans les eaux islandaises, et pendant l'été norvégien dans l'Atlantique nord-est

Le **procédé de fabrication** des farines consiste à séparer la matière sèche (future farine) de l'eau et de l'huile. La figure 30 représente la chronologie des différentes étapes d'un procédé de fabrication de farines de poissons. Il existe cependant d'autres alternatives à ce procédé.

Figure 30 : procédé de fabrication des farines et des huiles de poisson. (d'après www.srmjol.is)



Dans un premier temps, les matières premières sont déchargées du bateau de pêche à l'aide d'une pompe à poissons, d'une pelleuse ou d'un convoyeur mécanique. Les poissons sont pesés et mesurés en longueur (« **Scale** ») avant d'être acheminés vers un tank de stockage (« **Raw materials** »). C'est également à cette étape qu'a lieu le contrôle qualité des poissons : le prix est fixé en fonction de leur fraîcheur.

Les plus gros poissons (plus de 40 cm) sont hachés alors que les plus petits sont apportés à débit constant à un cuiseur à vapeur indirecte (« **cooker** »). La masse coagulée est pré-filtrée sur un tamis convoyeur ou une vis sans fin vibrante avant d'entrer dans la presse à double vis (« **press** »). De cette étape sortent deux produits : le « presscake » ou gâteau et la liqueur de pressage. Le gâteau est désintégré afin de faciliter son mélange avec le concentré de protéines solubles appelé stickwater, ainsi que son séchage dans un sécheur à vapeur indirecte ou un sécheur à flamme directe (« **driers** »). La farine passe au travers d'une vis vibrante aimantée afin de retirer les corps étrangers avant son entrée dans le système de refroidissement (« **cooler** »). Elle est ensuite moulue (« **grinder** ») puis dirigée vers le stockage sous forme de silos (« **silos** ») ou de big bags (sacs de 500kg).

Afin de retirer les débris, la liqueur de pressage passe au travers d'un décanteur (« **decanter** ») puis d'une centrifugeuse (« **separator** ») qui permet de séparer une phase huile de l'eau résiduelle ou « stickwater ». Les débris sont ajoutés au gâteau. L'huile est à nouveau purifiée (« **purifier** ») puis inspectée avant stockage. Des antioxydants sont généralement ajoutés à cette étape. L'eau résiduelle est concentrée grâce à un évaporateur. Le concentré de protéines solubles qui en résulte est soit conservé à part, soit mélangé avec les débris et le gâteau avant l'étape de séchage.

La qualité des farines varie considérablement en fonction de leur provenance. Une bonne farine a été séchée à une **température** n'excédant pas 90°C, considérant que 70°C est la température optimale. Dans le procédé LT (« **low temperature** »), les farines et les fluides sont chauffés à une température maximale de 70°C, les farines qui en sont issues sont appelées

« farines LT ». La teneur résiduelle en eau doit être inférieure à 10%, c'est un point critique pour la stabilité du produit. La **teneur en protéines** est proche de 70%. Il reste également des lipides à hauteur de 10 à 12%. La **teneur en cendres** doit être inférieure à 15%. En effet, les cendres contiennent différents minéraux dont du phosphore qui est un agent polluant de l'environnement. La disponibilité du phosphore résiduel, essentiellement sous forme d'hydroxyapatite, n'est que de 50% (*vs* phosphore venant d'un prémix du commerce disponible à 80%). Le désarrêtage est une étape qui permet d'obtenir une farine pure avec 75-80% de protéines et peu de calcium et de phosphore.

Quelques composés peuvent apparaître lors de la dégradation du poisson avant ou pendant le traitement comme des amines biogènes, par exemple. Ces composés sont dosés et participent directement à l'évaluation du prix versé au pêcheur pour les poissons servant à faire des farines.

La farine dite Sea Grain® est issue d'un nouveau procédé qui permet de conserver les fractions protéique et lipidique au sein de la farine. Le procédé de fabrication passe par des étapes de broyage, d'émulsification et de séchage des poissons « fourrage ». Les étapes de cuisson et de pressage des procédés traditionnels sont ainsi éliminés. Sans l'étape de séchage, le goût des matières premières d'origine est préservé, l'inconvénient de ce procédé est d'aboutir à une farine d'appétence variable en fonction du type et de la fraîcheur des poissons qui la composent, car le goût des matières premières est préservé (Hevrøy *et al* (2004)).

Les deux grands impératifs pour produire une farine de qualité, qui contient toutes les propriétés nutritionnelles initiales des poissons fraîchement pêchés, sont :

- de travailler une matière première ultra fraîche et de qualité (peu d'arrêtes),
- de sécher en douceur.

Les **huiles de poisson** sont très riches en AGPI à longue chaîne, et en particulier en EPA et DHA, ainsi qu'en vitamines liposolubles. Certaines apportent de l'astaxanthine comme l'huile de capelan. Elles doivent être protégées de l'oxydation par addition d'antioxydants tels que l'éthoxyquine ou la vitamine C.

Les huiles de poisson du marché (d'après *The production of fish meal and fish oil*, FAO) sont dites de qualité quand les critères suivants sont remplis :

- | | |
|--|---|
| - AG libres <3% | - n-3 environ 15% |
| - Fraction insaponifiable <2,5% | - EPA et DHA > 8% des acides gras |
| - eau + déchets < 0,3% | - éthoxyquine = 500ppm (produit ajouté) |
| - Valeur iode >135 mg de I ₂ en g se fixant sur 100g de lipides | |
| - vitamine E > 20 à 50 mg/kg (produit ajouté) | |

En plus de ces critères, une odeur et une couleur anormales diminuent la valeur de l'huile. L'humidité a l'inconvénient de faire rouiller les tanks de stockage.

Il existe également sur le marché des **concentrés de protéines solubles de poisson** (issus de l'hydrolyse des protéines de poisson). Ils sont essentiellement formés de peptides et d'acides aminés, donc très riches en protéines brutes et pauvres en cendres. Les hydrolysats de protéines de poisson stimulent l'ingestion et sont hautement digestibles et bien utilisés pour la croissance chez les saumons. L'effet majeur de l'ajout d'hydrolysats protéiques est d'augmenter la prise alimentaire. Dès 5% d'inclusion, la valorisation des protéines alimentaires pour la croissance est améliorée.

Un goût déplaisant est fréquemment rencontré dans les aliments avec les hydrolysats de protéines de poisson. Ce goût apparaît à la suite de formation de peptides solubles riches en acides aminés contenant des fonctions hydrophobes. On peut prévenir l'apparition de tels composés par le choix des enzymes utilisées pour l'hydrolyse et en réalisant des étapes de séparation dans les phases antérieures du procédé (Refstie *et al* (2004)).

Les **ensilages de poisson** sont également utilisés. Ce sont des produits liquides obtenus à partir de déchets de poissons conservés à pH acide et en anaérobiose. Un pH d'environ 4,5, permet l'hydrolyse en évitant les contaminations bactériennes. L'ensilage ne peut être ensuite utilisé qu'après avoir été neutralisé à l'aide de chaux par exemple. Ils sont pauvres en tryptophane qui a été détruit et ne peuvent être utilisés à fortes teneurs dans l'alimentation.

L'efficacité de l'ensilage comme source de protéines a été évaluée dans l'expérience de Espe *et al* (1999), décrite dans le tableau 15, page suivante.

Tableau 15 : comparaison de l'efficacité de différents aliments contenant des teneurs variables en ensilage de poisson, sur la croissance et la composition de saumons atlantique. (d'après Espe *et al* (1999)).

Aliment	Aliment témoin : farine de poisson de haute qualité	Addition d'ensilage de déchets du filetage de harengs		Ensilage de harengs entiers	
		15%	30%	15%	30%
% de farine de poisson substituée par concentré protéique	0%				
AA sanguins ($\mu\text{mol}/100\text{ml}$) (heures après le repas)	480 à 569 entre (6 à 12 h)	728 (3h)	524 (3h)	605 (12h)	655 (12h)
Mesure de la croissance	<p>coefficient de croissance thermique (TGC) de Saumons Atlantique nourris avec des aliments dont une part croissante de la farine de poisson était substituée par de l'ensilage produit à partir de harengs entiers (■) ou de déchets de filetage (*). les lignes pointillées (- - -) matérialisent les limites de l'intervalle de confiance (95%).</p>				
Accrétion protéique			Baisse	améliorée	Baisse
FCR			Pas de modification		
Ratio carcasse/ Poids vif			Idem		
Index hépatosomatique			Augmente quand taux d'inclusion augmente (de 0,8 à 1,31)		
Taux d'incorporation de protéines musculaires	Idem (mesuré par incorporation de lysine radiomarquée)				

En plus de cette expérience, une comparaison a été menée sur des taux d'inclusion croissants d'hydrolysats, par tranches de 5%, à raison de 0 à 40% de la farine de poisson substituée par de l'ensilage (Espe *et al* (1999)). L'ensilage a été produit par addition de 2,2% d'acide formique sur un broyat issu soit de poisson entier, soit de déchets de filetage de poissons sauvages, laissé quatre jours à température ambiante. Les protéines issues de poissons entiers sont plus solubles que celles issues de déchets.

L'utilisation de protéines solubilisées abouti à une élévation de la teneur plasmatique en acides aminés plus précoce que celle observée suite à la consommation d'aliments à base de

farine de poisson. Ceci est lié à une absorption plus rapide de ces nutriments et/ou à un taux de passage de la barrière gastro-intestinale plus élevé.

En augmentant l'inclusion d'ensilages dans les rations des saumons, la croissance est améliorée, ainsi que le taux de rétention des protéines (à de faibles niveaux de substitution). Ces deux observations peuvent être expliquées par le fait que les protéines sont utilisées de manière plus « économique », c'est-à-dire que les protéines néo synthétisées sont moins dégradées.

Une concentration en acides aminés plasmatiques plus élevée n'est pas nécessairement corrélée à une croissance supérieure. L'action sur la croissance est plus élevée chez les larves car leur équipement enzymatique est limité et que l'apport de protéines hydrolysées ainsi que d'enzymes protéolytiques permet une meilleure digestibilité.

Les **farines de crevettes** (déchets industriels contenant principalement des têtes) sont riches en calcium et très appétentes. Les **farines de krill*** sont fabriquées à partir d'animaux entiers et sont très intéressantes.

Au cours de la pêche, des poissons autres que ceux ciblés sont capturés dans les filets. Ce sont des « prises accessoires ». Comme les prises accessoires sont des produits soit à faible valeur, soit hors quota (individus trop petits, espèce non autorisée), elles sont le plus couramment rejetées en mer. On estime cette perte de matière première à 22 millions de tonnes par an. La farine de poissons issues de prises accessoires de la pêche à la crevette est une source intéressante de protéines pouvant remplacer plus de 50% de la farine de poisson LT.

Les farines de flétan du pacifique sont correctement digérées. Les farines de déchets de crevette et de déchets de filetage de poissons sauvages sont mal utilisées, du fait respectivement de leur faible digestibilité et de la haute teneur en chitine. Les farines de flétan du pacifique et les farines de poissons sauvages sont intéressantes dans la formulation d'aliments n'ayant pas une charge en phosphore trop élevée. Les facteurs limitants à l'usage de ces co-produits (tels que ceux ci-dessus cités : faible digestibilité, teneur en phosphore...) doivent être maîtrisés par des améliorations du procédé de fabrication, par l'optimisation de l'équilibre en acides aminés, de leur disponibilité et de leur goût (Li Peng *et al* (2004)).

Les farines issues d'animaux terrestres pourraient également être utilisées. Mais, même si elles sont intéressantes, les acteurs de la filière ont décidé en 1996 de ne plus les utiliser principalement en raison de l'encéphalopathie spongiforme bovine (cas des farines de viande issues de ruminants). Les **farines de déchets de volaille** et de sang sont parfois utilisées. Des protéines purifiées telles que la **caséine** ou encore le **lactosérum** ont une excellente valeur biologique. La gélatine est utilisée pour son fort pouvoir liant.

b) Matières premières d'origine végétale

Les matières premières d'origine végétale sont nombreuses et moins coûteuses que celles d'origine animale. A titre d'exemple : 1 point (ou % dans l'aliment composé complet) de protéines de farine de poisson coûte 0,80 €/kg alors qu'1 point de protéines de farine de soja coûte 0,30 €/kg. Les principales matières premières d'origine végétale sont des sources de vitamines B mais leur teneur en acides gras polyinsaturés à longue chaîne est presque nulle et elles sont moins appétentes. Elles apportent en sus des glucides dont l'amidon qui est mal digéré par les poissons.

Les tourteaux sont des co-produits de l'extraction des huiles. La teneur en protéines de tourteaux végétaux varie de 30 à 50%. Ils contiennent moins de cendres mais sont riches en cellulose et contiennent souvent des facteurs anti-nutritionnels.

Le **tourteau de soja** est le plus employé. Il est carencé en méthionine et contient des facteurs anti-trypsiens qui sont sensibles à la chaleur. C'est l'un des tourteaux végétaux contenant le moins de cellulose et de glucides complexes, avec 47,5% de protéines (si décortiqué), 3,4% de fibres, 1,9% de MG, et 6% cendres.

Le **tourteau de colza** est équilibré et relativement riche en cellulose. Le tourteau de coton est carencé en lysine et riche en gossypol.

Les **huiles végétales** ne contiennent pas de vitamines A ou D, pas d'astaxanthine et pas d'AGPI à très longue chaîne. Elles sont riches en acides linoléique et linoléique. Si les besoins en acides gras essentiels des poissons sont couverts, elles peuvent être apportées en tant que complément énergétique. Leur intégration dans les rations est cependant capable de modifier la qualité de la chair des poissons. En effet, la présence d'huiles végétales dans un aliment pour saumons modifie le profil en acides gras de l'aliment final, par rapport à un aliment uniquement composé de matières premières d'origine marine : la teneur en AGPI diminue, au profit de la teneur en AGMI de nature différente. Comme la composition de la chair des poissons reflète celle de l'aliment, les profils en acide gras de la chair des poissons sont modifiés, ce qui peut avoir pour conséquences des variations de texture, de goût...

Les **céréales** contiennent entre 8 et 14% de protéines. Ce sont des sources d'énergie, de vitamines E et B. Le phosphore y est peu disponible car présent sous forme de phytates. Les farines de blé ou de maïs sont riches en amidon qui, une fois traité thermiquement, est plus digestible et est un bon liant. L'utilisation de l'avoine est limitée en particulier à cause de la présence de ses glumelles.

Les **protéagineux** tels que la féverole ou le pois ont une composition proche du soja (25 à 45% de protéines). Ils contiennent des facteurs anti-nutritionnels (lectines) qui n'affectent pas les poissons. Des études sont en cours pour développer des farines à base de lupin contenant de 65 à 90% de protéines.

Des produits à base de concentrés et d'isolats protéiques de soja existent déjà : ils ont des valeurs nutritionnelles très variées en fonction de leur teneur en protéines. Des études ont mesuré les réponses nutritionnelles de salmonidés à l'incorporation de produits à base de soja et de lupin dans leur ration. Les truites et les saumons répondent différemment, en particulier sur le plan de leur digestion (Glencross Brett *et al* (2004)). Les saumons digèrent mieux l'azote de la farine de lupin et moins bien celui de soja que les truites. Les différences les plus nettes entre ces deux espèces concernent la digestion du phosphore.

Lorsque le niveau de transformation des farines de graines de lupin et de soja augmente, par un procédé industriel permettant l'augmentation de la teneur en protéines, et la diminution de la teneur en polysaccharides, la digestion de l'énergie et de la matière organique est améliorée (Glencross Brett *et al* (2004)).

Le milieu maritime produit également des végétaux qui peuvent être utilisés dans l'alimentation des poissons. Les **algues en farine** contiennent 23% de protéines, et 40 à 60% d'hydrates de carbone avec de l'amidon, de la cellulose, du mannitol, de la laminarine (forme particulière de glucides complexes avec des liaisons en β 1-3. Elles constituent en outre une source de calcium et d'éléments trace (Zn, I).

c) Organismes unicellulaires

Les organismes unicellulaires peuvent également apporter des protéines de bonne valeur biologique. On utilise des **algues unicellulaires ou filamenteuses** (*Spirulina, Chlorella*), **des levures** (*Candida, Saccharomyces*) **et des bactéries** (*Methanobacter, Pseudomonas*).

D'après Lutheri *et al* (2000), les micro algues peuvent être utilisées comme sources d'acides gras poly-insaturés, mais les profils d'acides gras varient en fonction des nutriments du milieu de culture. Le meilleur milieu en terme de profil d'acides gras final, le plus pratique et au meilleur coût est de l'eau de mer enrichie en azote et en phosphore. Dans ce milieu, les rendements et la productivité en AGPI était de 0,502 mg/l/jour d'EPA et 0,228 mg/l/jour de DHA. Les durées d'incubation des micro algues mises en culture de l'étude étaient de 20 jours.

Tableau 16 : Composition moyenne de micro algues mises en culture sur de l'eau de mer enrichie en azote et phosphore, d'après Lutheri *et al* (2000).

Composition moyenne des micro algues	Protéines	4 pg/cellule
	Lipides	16 pg/cellule
	Hydrates de carbone	4,10 pg/cellule
	Chlorophylle A	0,07 pg/cellule
	Ac palmitique	2,56 pg/cellule
	Ac palmitoléique	1,76- 2,88 pg/cellule
	Ac eicosapentasenoïque (EPA)	1,6- 4 pg/cellule
	Ac docosahexanoïque (DHA)	0,8- 1,6 pg/cellule

Une levure particulière (*Phaffia rhodozemia*) est produite comme source de pigments caroténoïdes. Certaines levures apporteraient des facteurs de croissance (Non Démontré). Elles apportent également des glucanes pariétaux qui semblent efficaces dans la stimulation de l'immunité et sont d'ores et déjà présents dans des aliments pour poissons (aliments distribués lors de périodes à risque telles que le transfert en mer).

L'utilisation de gaz naturel comme source de carbone et d'énergie pour la production de protéines bactériennes par fermentation représente une voie intéressante pour produire des protéines pour l'alimentation des poissons. Certaines bactéries cultivées sur méthane ont une composition en acides aminés intéressante sur le plan nutritionnel, leur teneur en acides aminés est équivalente à celle de la farine de poisson. L'équilibre n'est cependant pas parfait pour deux acides aminés : en général, la lysine est présente en trop faible quantité, alors que le tryptophane l'est en excès. La teneur en matières grasses est la même que dans les farines de poissons, mais la composition est différente : les bactéries apportent majoritairement des phospholipides et pas d'acides gras polyinsaturés. Elles contiennent également moins de cendres.

Une farine de protéines bactériennes a été approuvée (Bioprotein®) en Europe depuis 1995, à raison de 19% au maximum dans les aliments composés complets des saumons d'eau douce et 33% en mer. Cette source de protéine est composée de bactéries aérobies tuées et séchées des espèces *Methylococcus capsulatus* (Bath), *Alcaligenes acidovorans*, *Bacillus brevis* et *Bacillus firmus*.

La digestibilité des protéines de Bioprotein® est proche de celle de farines de poisson LT. La digestibilité des lipides n'est normalement pas affectée. Cependant, dans l'étude de Storebakken *et al* (2004), une diminution de la digestibilité des lipides a été observée : elle est vraisemblablement liée à la présence de polysaccharides non amylacés issus des membranes bactériennes.

d) Additifs et produits purifiés

Les **acides aminés de synthèse** tels que la méthionine et la lysine sont utilisés pour équilibrer les aliments déficients. Ces molécules sont très solubles donc facilement perdues dans le milieu aquatique. Afin de limiter les pertes dans le milieu aquatique, il est important de réduire le temps de séjour des aliments et la quantité de granulés perdus dans l'eau.

Les additifs « vrais » sont selon le règlement 945/2005 de la commission en date du 21 juin 2005 concernant l'autorisation permanente de certains additifs dans l'alimentation des poissons, selon la directive 70/524/CEE, les règlements 1831/2003 et 93/2005 :

- les **substances ayant des effets antioxygènes** protégeant tout particulièrement les AGPI à longue chaîne de la peroxydation. La vitamine C séquestre l'oxygène, l'acide citrique et l'EDTA sont des chélateurs des métaux; les tocophérols et l'éthoxyquine sont des donneurs de protons. Il est intéressant d'associer plusieurs antioxydants sur la base de leur activité. En production aquacole, la vitamine C, l'éthoxyquine et les tocophérols sont le plus souvent associés.
- les **émulsifiants, stabilisants, épaississants ou gélifiants**. Ces substances sont presque toujours des polysaccharides : des extraits d'algues (alginates), de plantes terrestres (lécithine et pectines), des extraits animaux (chitosanes) et bactériens (gommes xanthanes). Certaines de ces sources sont aussi utilisées pour leur pouvoir liant (blé, maïs). Huit aliments différents ont été testés afin de comparer l'effet du type de liant et de leur concentration. La gélatine est le meilleur liant des granulés avec la gomme guar (Pearce *et al* (2002)).
- les **vitamines et provitamines**
- les **oligo-éléments**
- les **substances aromatiques et apéritives ou attractants** sont de trois types (d'après Guillaume *et al* (1999)): ceux qui immobilisent l'animal près de sa proie (immobilisants), ceux qui l'incitent à la goûter (incitants) et ceux qui entraînent la poursuite de l'ingestion (stimulants). Les farines de poisson et de crevettes sont particulièrement attractantes pour les poissons et agissent principalement sur les sens de l'olfaction et du goût. Les principaux attractants sont les acides aminés de la série L, la bêtaïne et d'autres molécules possédant un atome d'azote pentavalent et, enfin, les nucléosides et nucléotides.
- les agents **conservateurs** tels le sorbate de potassium.
- les agents **liants, antimottants et coagulants**.
- les **microorganismes** et les **probiotiques** sont des micro-organismes introduits dans la ration qui auront une efficacité zootechnique. La société Lallemand© (Montréal, Québec) vient de mettre sur le marché des probiotiques permettant d'améliorer la réponse immunitaire de saumons en période critique (transfert en eau de mer). Le Levucell©SB est constitué de souches de *Saccharomyces cerevisiae boulardii* et prévient les infestations par *Clostridium difficile*. Le Bactocell©SB est constitué de souches de *Pediococcus acidilactici*.
- les **enzymes**. Les phytases apportées permettent d'améliorer l'utilisation du phosphore sous forme de phytates et de réduire les rejets phosphorés. L'effet de phytases

microbiennes encapsulées dans des microcapsules de Chitosan-alginates a été étudié dans le cadre d'une amélioration de la résistance thermique de l'enzyme (Vanderberg *et al* (2003)). Des rations à base de protéines végétales ont été supplémentées de 3000 FTU de phytases/kg sous forme libre ou encapsulée. La supplémentation de l'aliment riches en protéines d'origine végétale en phytase a amélioré la digestibilité apparente de nombreux nutriments et la croissance, l'efficacité alimentaire, et la rétention d'N et de P), améliorant ainsi la croissance et la minéralisation des tissus. L'encapsulation des phytases réduit cet effet, comme si l'encapsulation limitait la distribution de cette enzyme et donc la capacité de l'enzyme à libérer du phytate-P alimentaire.

- **les matières colorantes y compris les pigments** : les caroténoïdes avec la canthaxanthine, l'astaxanthine (artificielle ou apportée par le biais de farines de crevettes ou l'utilisation du microorganisme *Phaffia rhodozemia*).

B. Facteurs antinutritionnels

Des composés indésirables peuvent être présents dans les matières premières servant à l'alimentation des poissons. Des polluants peuvent contaminer les matières premières tels que les pesticides et les métaux lourds. Des composés toxiques peuvent être présents sur le produit comme des amines biogènes sur les poissons fourrages apparaissant au cours de leur dégradation, ou être accumulés lors du stockage ou du transport du produit comme les toxines fongiques ou algales. Certains facteurs antinutritionnels sont des composants à part entière de matières premières, en particulier végétales.

On distingue (d'après Guillaume *et al* (1999)) :

- les anti-nutriments comme les facteurs anti-trypsiques qui limitent l'utilisation de nutriments spécifiques,
- les composés limitant l'efficacité des processus de digestion de manière plus ou moins spécifique tels que l'acide phytique,
- les composants modifiant le métabolisme comme les composés anti-thyroïdiens des crucifères,
- les substances au mode d'action multiple.

Certains facteurs anti-nutritionnels peuvent être réduits, détruits ou inactivés par un traitement approprié. La chaleur permet d'inactiver les composés de nature protéique. La séparation de la phase huileuse permet d'enlever les composés liposolubles (d'après Guillaume *et al* (1999) et Pennel (1996)).

L'acide phytique est la forme sous laquelle est complexée 2/3 environ du phosphore végétal (inositol hexaphosphate). Cette molécule peut complexer des molécules diverses et former des sels avec les métaux divalents. La molécule est donc une source d'éléments indisponibles, c'est un anti-nutriment qui piège des minéraux, et peut diminuer l'efficacité d'enzymes digestives. Cette molécule est très stable.

Les **facteurs anti-trypsiques** sont présents dans le soja. Ils inhibent l'activité de la trypsine, de la chymotrypsine et de l'élastase ce qui altère la digestibilité des protéines. Les poissons compensent en augmentant la sécrétion de trypsine, ce qui s'accompagne le plus souvent d'une hypertrophie du pancréas insuffisante pour rétablir une bonne digestibilité des nutriments. Ces facteurs entraînent une carence en acides aminés soufrés et une perte de protéines endogènes. Ces facteurs sont thermolabiles.

Les lectines ou hémagglutinines sont présentes dans les végétaux et les animaux inférieurs. Elles agglutinent les hématies et exercent un effet anti-nutritionnel en se fixant à des sucres libres et des résidus de polysaccharides, ainsi que sur les membranes cellulaires des entérocytes dont elles altèrent les fonctions absorbantes. Les lectines de soja sont résistantes à l'action des enzymes digestives. La cuisson permet de les inactiver, et elles peuvent être extraites en milieu aqueux.

Les **glucosinolates et facteurs anti-thyroïdiens** sont des molécules synthétisées par certaines plantes (choux, brocolis, colza) ou des produits de dégradation apparus lors de différents traitements technologiques. L'hydrolyse des glucosinolates aboutit à la formation de molécules telles que les isothiocyanates qui diminuent l'appétence, ou la goitrine qui est responsable d'un effet antithyroïdien (par altération de la liaison organique de l'iode). La toxicité de ces composés est assez variable en fonction des individus au sein même de l'espèce saumon Atlantique.

Les **tannins** sont des polyphénols. Les tannins condensés avec des protéines ou des enzymes digestives sont des facteurs anti-nutritionnels vrais. Ils sont localisés le plus souvent dans la pellicule des graines. L'acide érucique de la graine de colza ainsi que les tannins interfèrent avec des processus métaboliques et occasionnent des lésions cardiaques. Les tannins diminuent également l'absorption du fer, via la formation de précipités insolubles de tannates de fer. Les tannins augmentent la sécrétion des enzymes digestives, et augmentent ainsi les pertes endogènes de protéines.

Les végétaux contiennent également des facteurs oestrogéniques, des acides aminés non protéiques bloquant la synthèse protéique et des anti-vitamines, des alcaloïdes tels que le gossypol du coton responsable de nécrose hépatique. Le coton possède aussi des acides gras cyclopropènes qui ont le même effet que le gossypol et potentialisent l'effet de mycotoxines telles que l'aflatoxine B1.

Les produits d'origine animale contiennent aussi certains facteurs antinutritionnels : dans le poisson cru, et ce d'autant plus que les poissons ont perdu de leur fraîcheur, on trouve une enzyme hydrolysant la thiamine : la **thiaminase**. Cette enzyme est en particulier présente dans l'ensilage. Elle est détruite par la chaleur. On peut prévenir son apparition par l'utilisation de poisson frais et par l'ajout de thiamine. L'**histamine** est une amine biogène dérivant de l'histidine, dont la quantité augmente avec la dégradation des poissons (surtout chez le thon, le maquereau...). Elle provoque des réactions pseudo-allergiques. Les **lipides péroxydés**, apparaissant en fin de réaction de peroxydation des AGPI donnent naissance à des composés qui sont des facteurs anti-nutritionnels : des aldéhydes et des cétones. Ils entraînent une inappétence, des déficiences en vitamines protectrices (C et E) et des inhibitions enzymatiques.

C. Formulation des aliments en aquaculture

Pour mettre au point un aliment pour saumons, les **besoins nutritionnels** des poissons doivent être considérés en fonction du comportement alimentaire de l'espèce et du métabolisme digestif. Pour certains nutriments, les besoins sont mal connus et des marges de sécurité doivent être prises (vitamines). Pour les poissons, le milieu de vie est un paramètre important car les besoins diffèrent, selon que le poisson vit en eau douce ou en eau salée, selon la teneur en oxygène du milieu, et selon la saison.

Pour répondre aux besoins, les formulateurs disposent de la **composition des matières premières disponibles**, en incluant la présence de facteurs anti-nutritionnels ou d'appétabilité

(difficile à quantifier). L'équation permettant de calculer la composition de l'aliment prend également en compte **les contraintes technologiques** ainsi que les **impératifs économiques** et de productivité de l'élevage, sachant que le coût de l'aliment constitue le poste principal de l'élevage de saumons.

La principale technique de formulation repose sur la formulation linéaire au moindre coût. Des inéquations sont posées en fonction des contraintes nutritionnelles et du coût qui doit être minimisé. Quelques nutriments ne doivent pas dépasser un certain seuil (fibres, minéraux, glucides). Parfois d'autres équations s'ajoutent pour prendre en compte certaines contraintes techniques comme la teneur minimale en liant pour que les granulés aient une cohésion suffisante. La variation du coût des matières premières est directement prise en compte dans la formulation. Le niveau d'incorporation d'un ingrédient peut augmenter suite à une diminution de son prix d'achat. Les contraintes en protéines et en acides aminés sont les plus coûteuses avec les apports en acides gras polyinsaturés réalisés par les huiles de poisson.

Les limites de ces formulations sont issues des approximations. On admet que la digestibilité d'une ration est une fonction linéaire de celle de ses composantes. Or, au-delà de certaines teneurs, la valeur énergétique d'un ingrédient comme l'amidon cru décroît car les capacités de digestion-absorption sont saturées. De même, il existe des interactions entre certains nutriments : pour les acides gras saturés, la digestibilité est améliorée si suffisamment d'acides gras insaturés sont apportés ; et pour la méthionine, le besoin dépend des apports en cystine.

La cuisson extrusion est le seul moyen d'obtenir des aliments flottants et d'incorporer de fortes teneurs en lipides (jusqu'à 40% par le procédé de la société Skretting). La cohésion des granulés est apportée par des agents texturants. Un aliment riche en farine de poisson, ingrédient fragilisant l'agglomérat, devra comporter plus de liant qu'un aliment comprenant de la farine de blé ou de maïs. Sur le plan écologique, la pollution doit être limitée : l'aliment doit se déliter le moins possible dans l'environnement, et entraîner le moins possible d'émissions fécales et d'excrétions azotées. Aussi, les propriétés physiques de l'aliment doivent être étroitement mesurées (dureté, cohésion, flottaison..), et la quantité d'énergie non digestible doit être restreinte.

La qualité de l'aliment se mesure aux performances qu'il permet d'obtenir (vitesse de croissance, indice de consommation de l'aliment, coût de production du saumon) et aux qualités technologique, organoleptique et nutritionnelle de la chair des poissons ; l'effet des aliments reste cependant soumis à de nombreux autres facteurs de variation tels que le mode d'élevage, l'état sanitaire, le niveau de rationnement.

« L'aliment idéal » est donc celui qui couvre les besoins alimentaires des animaux à un coût économique raisonnable et bénéfiques pour les entreprises concernées : fabricants d'aliments, éleveurs, transformateurs ainsi qu'à la communauté chargée de la préservation de l'environnement (Glover *et al* (2004)).

D. Fabrication des aliments

Les aliments usuellement distribués aux poissons existent sous différentes formes (d'après Pennel (1996)) avec des formes:

- **humides ou semi humides** obtenus à partir de produits de poisson pasteurisés et liés ensembles ou dénaturés par différents matériaux et distribués au frais, ou extrudés afin d'être distribués à de plus gros poissons.

- **micro particulés** réalisés en mélangeant différents composants et en les pulvérisant, puis en sélectionnant les particules par taille. Les éléments trace, les vitamines et les composés lipidiques sont ajoutés à un moment variable du procédé de façon à couvrir les besoins du frai.
- **micro encapsulés** fabriqués en formant un revêtement externe à l'aide de protéines, lipides ou de matériel fibreux. L'équilibre en acides aminés, les additions de lipides et le supplément vitaminique sont réalisés lors du procédé de micro encapsulation.
- **floconnés** issus d'un séchage flash d'un mélange de farines supplémentées en lipides, vitamines et éléments trace qui sont séchés et triés par taille (utilisés pour le frai).
- **miettes** issues de la compression de granulés obtenus à partir d'un mélange de divers ingrédients complétés en vitamines, éléments trace et lipides. Les granulés sont émiettés et tamisés selon la taille des individus.
- **petits granulés** de 1 à 2 mm obtenus par compression d'un mélange de divers ingrédients complétés en vitamines, éléments trace et lipides, puis extrudés au travers d'une vis sous haute pression. Ils sont distribués au frai (les plus gros stades) et la taille des granulés augmente lorsque les poissons sont plus gros.
- **granulés roulés** faits par enroulement des mélanges de farine sous brumisation d'eau, puis collecte des particules, séchage et sélection sur la taille et l'aptitude à la flottaison. Les tailles sont adaptables à des poissons de tous âges.
- **granulés expansés** (>2mm), fabriqués à partir de matières premières supplémentées en minéraux et en lipides puis expansés sous vapeur haute pression. Après expansion, ils sont refroidis et sélectionnés par taille et par aptitude à la flottaison. Ces granulés, de par leur caractéristique de liaison supérieure et leur stabilité dans l'eau, sont les plus utilisés actuellement.

Le procédé de fabrication des granulés expansés est constitué de étapes : le dosage des farines qui précède une étape de mélange et d'homogénéisation de cette fraction solide. Le pré-mélange est ensuite soumis à cuisson-extrusion puis à séchage. La phase liquide (mélange huile/ eau/ pigments) est ensuite ajoutée au « granulé » qui a une structure d'éponge. L'ensemble est refroidi avant d'être conditionné.

1- Dosage/ mélange des farines :

Dans un premier temps, les farines, ingrédients secs, sont mélangées en préparation de l'extrusion à venir. Comme nous l'avons vu plus haut, le diamètre des particules d'aliment est variable en fonction de la taille des poissons. Même aux diamètres les plus fins, la composition finale doit être homogène. Or le diamètre final est conditionné par le grain initial de la mouture et le diamètre des moules utilisés en fin de procédé. Un broyage peut permettre d'uniformiser et de réduire le grain de la mouture. De plus, la taille des particules des farines de poissons modifie la croissance et l'utilisation de l'aliment en modifiant le temps de transit. (cf. partie II - A, anatomie et physiologie du tube digestif).

Une taille moyenne des particules inférieure ou égale à 500µm est recommandée dans les aliments pour les adultes, 250µm pour les juvéniles et moins de 50µm pour les larves. Une maille de tamis de 800µm suffit pour obtenir des tailles moyennes de particules d'environ 500µm.

Le dosage se fait de manière massale. Il permet de sélectionner l'apport des matières premières dans les proportions définies. Dans la plupart des fabriques d'aliment, il existe trois types de balances en fonction de la précision nécessaire : la balance pour les farines de poisson et les farines végétales, la balance pour la farine de crevette (5 à 7% du produit fini) et

la balance pour les vitamines et les pigments (la plus précise pour un élément représentant 1% du produit fini).



Photo 1 : balance à farine (2000kg), imprécision en kg (d'après photos de l'auteur)



Photo 2 : balance à pigments avec imprécision 5g

2- Mélange :

Cette étape a pour but l'homogénéisation de la préparation. Dans le mixeur, il y a addition d'eau, de vapeur, d'huile (addition à des fins technologiques car si les particules les plus grosses ne sont pas cimentées par les plus petites et par l'huile, il risque d'y avoir un « démixage » à chaque fois que la denrée est en mouvement). La température, la vitesse de circulation des matières premières, sont suivies en continu. L'ensilage produit par recyclage des premiers lots produits est ajouté au mélange, avant entrée dans l'extrudeuse, à un taux d'incorporation voisin de 6%. Lorsque la valve autorisant le passage du mélange de farine vers l'extrudeuse s'ouvre, la température est au moins de 80°C.

3- Cuisson -Extrusion :

Ce procédé cumule les effets de la pression et de la température. Il aboutit à la mise en forme des granulés par passage dans une ou plusieurs filières.

Pour les 100 premiers kilos produits lors du démarrage de la production, la température n'est pas assez élevée. Le système est placé en boucle fermée et le « mix » est recyclé soit par retour dans le mélange, soit par fabrication d'ensilage après addition d'acide et d'eau douce. L'extrudeuse a une température de 95 à 100°C. Le circuit ne s'ouvre vers la production de granulés que lorsque la température du mélange des matières premières est montée à 90/95°C.

La capacité des extrudeuses est variable, celle présentée sur la photographie 3 a une capacité de 12 à 15 tonnes par heure.



Photo 3 : Extrudeuse

Le granulé a une structure alvéolaire caractéristique. L'humidité et la température dans l'extrudeuse conditionnent les caractéristiques physiques de l'aliment. Une température élevée et une humidité faible produisent des aliments très expansés, flottants, se réhydratant lentement.

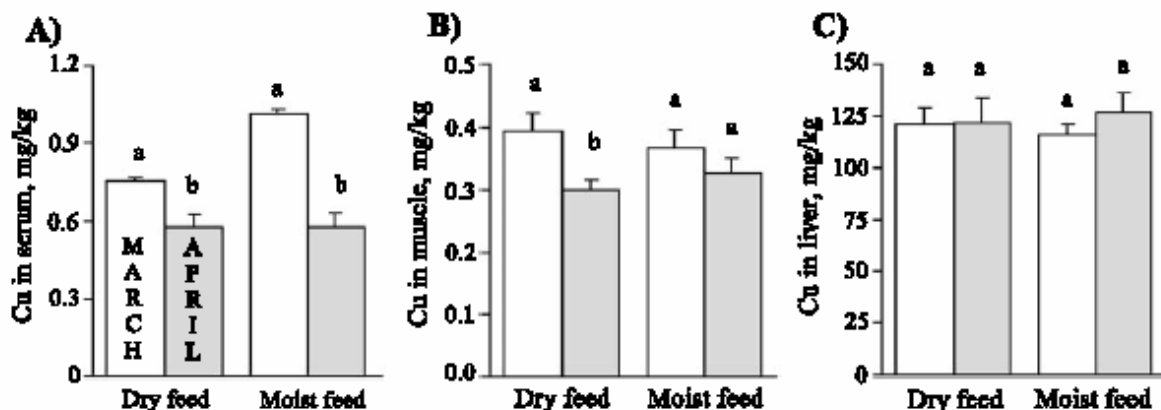
L'étude de Mørkøre (2004) a comparé l'effet d'un aliment humide et d'un aliment extrudé sur la texture, le gaping et le statut cuivrique de la chair du saumon (mesuré en teneur en cuivre dans le sérum, les muscles et le foie). L'étude a eu lieu sur la période de janvier à mai (tableau 16). A cause de contraintes technologiques, les aliments humides ne peuvent cependant avoir la même densité énergétique que les aliments extrudés : l'étude consiste donc également à comparer deux aliments à ratio PD/ED équivalent.

Tableau 16 : Comparaison de l'effet de deux présentations différentes d'aliment (humide vs extrudé) sur les performances de croissance de saumons de 2,3kg (d'après Mørkøre (2004)).

	Aliment humide alginates (MF) 19,8 MJ/ kg MS 43% de MS 28% de Protéines (% de MS) PD/ED = 1,45	Extrudé commercial (DF) 27,7 MJ / kg MS 93% de MS 43% de Protéines (% de MS) PD/ED = 1,5
Poids final	3,55kg	4,01kg
Activité de nage	Nage plus profonde et plus active	
MS du muscle	Constant : 32%	Augmente : 32 à 35% au cours du temps
pH	6,33 en avril	6,10 en avril
Résultat final		
MS	Pas d'augmentation significative	Augmentation (lien linéaire MG)
Facteur k	1,2	1,4
Rendement filet	55,9	57,8 (proportion tête, os et nageoires diminuée)
Teneur gras filet	11,3	14,2
% de poissons supérieurs	72	61

L'aliment MF contient plus de cuivre, mais celui-ci est piégé par des alginates. De plus il contient également plus de phosphore et de calcium qui diminuent l'absorption d'autres éléments. La diminution des teneurs musculaires et sériques observée de mars à avril (figure 31) est due à une baisse du transport des éléments du tube digestif vers les autres tissus, à un ralentissement de l'activité métabolique, et à une diminution des protéines sériques de transport.

Figure 31 : Comparaison de l'effet de deux présentations différentes d'aliment (humide vs extrudé) sur le statut cuivrique de saumons de 2,3kg. Teneur en cuivre du sérum (A), des muscles (B) et du foie (C). des lettres différentes signifient que les valeurs sont statistiquement différentes ($P < 0,05$) entre les périodes d'échantillonnage, au sein d'un même traitement (d'après Mørkøre (2004)).



L'aliment humide, de part sa teneur en eau limite le stress osmotique sur les poissons, ce qui est entre autres révélé par un taux de problèmes cutané nettement diminué. Cet aliment est cependant plus compliqué à stocker et plus fragile à l'oxydation.

4- Sécheur :

Le sécheur permet de ramener la teneur en eau de 35 % en sortie d'extrudeuse à 6 % environ en sortie de sécheur. Il est divisé en 4 zones à des températures différentes (125, 105, 95, 90°C). Au fur et à mesure de l'avancée du produit, la température diminue avec un différentiel entre chaque zone qui va en diminuant. Le temps de résidence des matériaux dans chaque zone est de 45 minutes. Les postes les plus forts consommateurs en énergie sont les sécheurs et le recyclage. Il y a plusieurs possibilités d'énergie utilisable. Le choix est fait en fonction du coût relatif de chaque type d'énergie (électricité, propane...).

5- Addition du pré-mélange huile-eau-pigments :

L'huile est mélangée avec des pigments au préalable dilués avec de l'eau. Ce prémélange est ajouté au produit d'extrusion qui se comporte comme une éponge. L'huile est ajoutée en fonction des quantités finales désirées en matières grasses dans l'aliment. Quelques litres d'eau sont nécessaires pour diluer les pigments et les incorporer dans les aliments finis. La plupart des fabriques d'aliment utilisent un système de pilotage automatisé et de calcul des doses de chaque ingrédient en fonction des contraintes nutritionnelles et technologiques, ces systèmes permettent également la gestion des stocks en continu.

Pour les pigments (astaxanthine, canthaxanthine...), le produit matière première doit être dilué dans le mélange eau et huile. En général, dans les aliments la concentration finale en astaxanthine est de 50 mg/kg d'aliment fini. Les matières premières les plus utilisées comportent 500 mg de pigments/kg : elles sont donc diluées au dixième. Le mélange pigment-huile-eau se fait dans une mélangeuse (par exemple Vacum conterND) : pour un aliment à 32,2 % de matières grasses on ajoute 481 kg pour 1505 kg de farine.

6- Refroidissement :

Le point de fusion de l'huile de poisson est de 15°C. La température finale cible du produit est donc inférieure. En fin de procédé, un air froid permet d'abaisser la température des granulés de 40°C à 12°C, tout en enlevant une partie de l'eau. Ce refroidissement permet la formation d'une coque protectrice autour de l'aliment. Les pellets sont refroidis, puis stockés en vue du conditionnement. Le mélange avec le mix eau-pigments s'étant déroulé à 35°C, les pellets restent ensuite en chambre de refroidissement pendant 30 minutes, jusqu'à la température de 3,5°C. La durée de vie durant laquelle les qualités nutritionnelles sont garanties est de 3 mois après fabrication.

Les aliments sont caractérisés en fonction des valeurs suivantes :

- taille des particules, masse volumique,
- résistance à l'abrasion (friabilité selon la norme norvégienne ASAE S 269),
- résistance à l'écrasement (force nécessaire à la rupture),
- aptitude à la réhydratation,
- stabilité à l'eau ou taux de délitement.

Les règles liées aux problèmes techniques d'un aliment pour saumon sont qu'un aliment contenant moins de farines de poisson a besoin de moins de liants, qu'un aliment plus riche en farines et en concentrés protéiques de poisson doit intégrer plus de liants et de matières

grasses, et qu'un aliment composé de plus de concentrés protéiques contient plus de leucine et moins d'acides aminés non énergétiques totaux (Dunajski (1979) et Espe et al (1999)).

E. Distribution de l'aliment aux poissons

Le rationnement consiste à ajuster la quantité d'aliment distribuée aux besoins théoriques des poissons à un instant donné. On parle de taux de rationnement lorsque la quantité d'aliment distribuée est différente des besoins théoriques : il s'exprime en % du niveau de rationnement optimal. La méthode de distribution doit être appropriée afin d'éviter que l'aliment ne soit gaspillé et ne détériore la qualité de l'eau du milieu, et que certains poissons ne soient défavorisés au profit d'autres.

Le taux de croissance spécifique et l'indice de consommation dépendent du taux de rationnement. L'intervalle entre les taux de rationnement donnant la meilleure efficacité alimentaire et ceux permettant la meilleure croissance détermine la marge de manœuvre de l'éleveur. Au sein de cet intervalle, l'éleveur peut choisir de privilégier la croissance ou l'efficacité alimentaire. Chez la truite, le maximum de croissance et le coût alimentaire minimum sont obtenus par une alimentation en « libre service contrôlé ».

Le **mode d'alimentation** le plus usité chez les saumons est l'alimentation à satiété. La satiété est évaluée soit :

- par la distribution d'aliment en fonction du comportement des poissons : lorsque les poissons arrêtent de s'agiter et de consommer l'aliment, cela indique un arrêt de la prise alimentaire. La satiété réelle (absence de sensation de faim) ne sera obtenue qu'avec un nombre de repas suffisant (deux ou trois par jour). Avec un seul repas par jour, les poissons s'arrêtent de manger quand leur estomac est plein.

- par l'utilisation de distributeurs en libre-service qui apportent au poisson une quantité d'aliment à la demande. La demande se manifeste par l'activation d'un système de distribution par une pression simple ou répétée sur un piston de distribution. A la suite de cette stimulation, une quantité d'aliment est distribuée.

Afin d'évaluer les pertes alimentaires et de limiter la pollution du milieu, des dispositifs de collecte de l'aliment peuvent être mis en place (grilles à la sortie des bassins, plateaux au fond des cages). Les pertes d'aliment sont un problème majeur en aquaculture, tant sur le plan environnemental qu'économique. Le poste « alimentation » représente entre 45 et 60% du coût de production des saumons.

Un modèle mathématique a été mis au point afin de calculer les pertes d'aliment et le mode de distribution optimal (Alver *et al* (2004)). La concentration en pellets dans le bassin varie en fonction de la durée du repas, de la dispersion des granulés à la surface, du courant, ainsi que du nombre, de la taille (moyenne et écart type) et de l'appétit des poissons. Lorsque les granulés sont distribués à la surface de l'eau (cas le plus fréquent), la profondeur moyenne des granulés au cours du repas est un des facteurs clefs permettant de détecter toute réduction de l'appétit des poissons et de décider à quel moment stopper la distribution d'aliment afin de réduire les pertes.

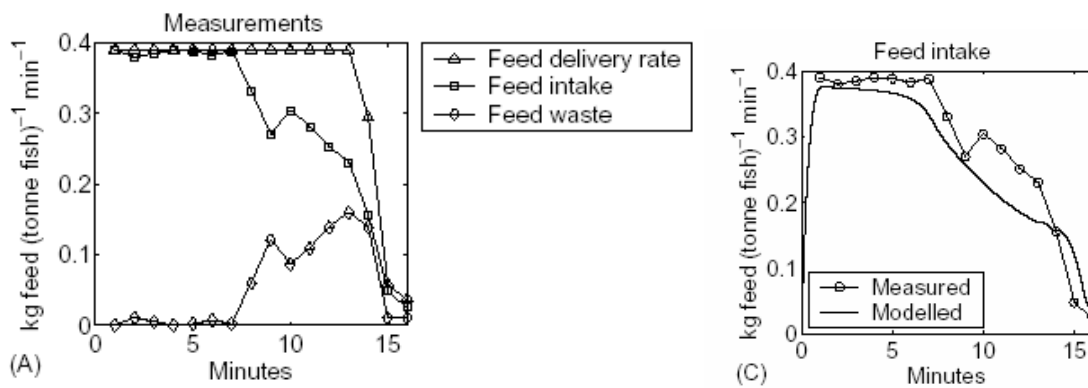


Figure 32. Mesure (measurements) de la perte d'aliment (feed waste) et de la prise alimentaire (feed intake) dans un bassin de saumons, comparé à la distribution de l'aliment (feed delivery rate) (A). Evolution de la prise alimentaire au cours d'un repas (C). (Talbot *et al.*, 1999)

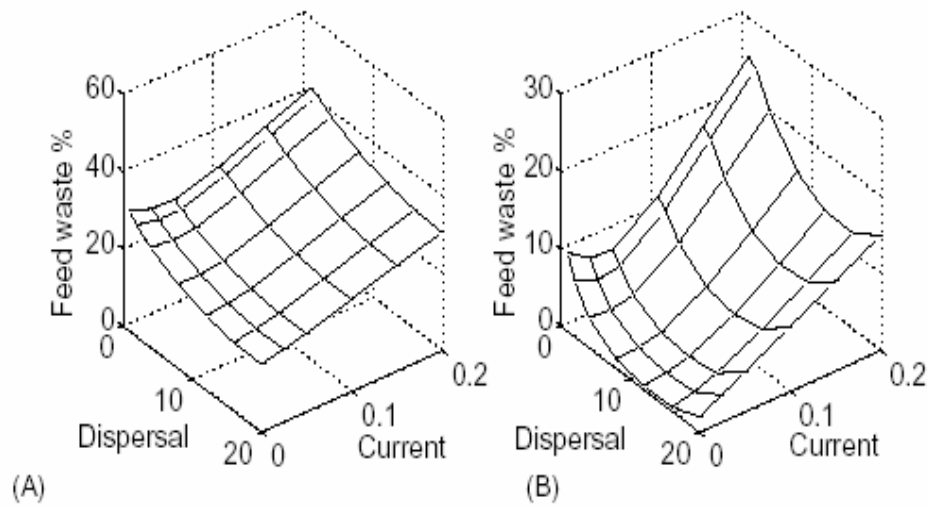


Figure 32 bis : Perte relative en aliment pour différentes valeurs de dispersion de l'aliment (b1 et b2) et de courant (m/s). En B, le taux de distribution de l'aliment est réduit de 40% par rapport à A. On observe que la perte de granulés et leur dispersion augmentent lorsque le courant est plus fort.

Quand les poissons commencent à être rassasiés, la profondeur moyenne des granulés augmente au centre de la cage. Le moment où l'équilibre distribution/consommation est rompu correspond à l'augmentation de la profondeur moyenne des granulés. Il dépend de l'intensité de la distribution et de l'appétit total des poissons. L'interruption de la distribution permet de réduire considérablement les pertes en granulés. Une ration quotidienne correspondant à 0,35% de la biomasse permet de réduire considérablement le taux de gaspillage (0,12% de pertes) mais réduit aussi la quantité d'aliment distribuée, ce qui peut perturber la croissance. A 0,5%, les pertes représentent 1,5% de la quantité distribuée alors qu'un rationnement de 0,75% de la biomasse génère des taux de pertes de 18,2%.

C'est surtout en fin de distribution que le taux d'alimentation ne doit pas être trop élevé. Idéalement, le taux de distribution doit être important en début de repas et faible à la fin. Un schéma simple de rétrocontrôle a été appliqué pour un repas standard de 2 heures avec une intensité de distribution initiale de 0,75% de la biomasse: quand la profondeur moyenne des granulés va au delà de 5m de profondeur, le taux d'alimentation diminue et passe à 75% du taux originel, à 50% à 6 m, à 25% à 7 m, pour être stoppé à 10 m (fond des bassins de cette étude de Talbot *et al* (1999)).

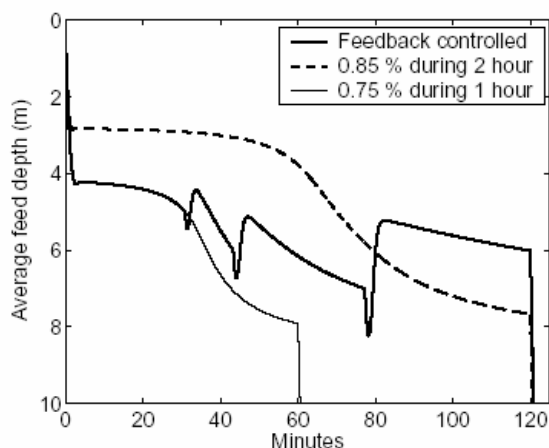


Figure 33 : Profondeur moyenne des granulés en fonction du temps dans une simulation menée avec rétrocontrôle négatif (*feedback controlled*, en gras) comparé à deux simulations à taux constant de distribution d'aliment. D'après Talbot *et al.* (1999)

Le rétrocontrôle de la consommation et l'ajustement de la distribution permet de réduire les pertes de granulés.

En augmentant le taux de distribution maximal, la quantité d'aliment distribuée augmente, le taux de gaspillage également. Par contre, l'augmentation du temps du repas augmente la quantité d'aliment distribué mais diminue les pertes.

Comme nous l'avons déjà dit, la **régulation de l'ingéré** se fait, chez le saumon comme chez les animaux terrestres, par l'énergie alimentaire. Des limites à cette régulation sont rencontrées lors de la distribution d'aliments peu énergétiques car la quantité ingérée est limitée par le volume stomacal. Pour des aliments très énergétiques, la quantité ingérée peut dépasser les besoins de l'animal. La fraction excédentaire est stockée sous forme de dépôts lipidiques. Ces dépôts tendent à augmenter les pertes à éviscération.

Les apports alimentaires doivent couvrir le besoin d'entretien qui est fonction de la taille et de la croissance. Les besoins augmentent avec la température jusqu'à l'optimum thermique puis diminuent. Dans la zone d'optimum thermique, la part de l'énergie utilisée pour la croissance est la plus élevée, c'est donc là que l'efficacité alimentaire est la meilleure. De nombreux autres facteurs peuvent modifier les besoins, l'éleveur devra donc en permanence réajuster les quantités d'aliment distribuées aux performances des poissons et aux conditions d'élevage, avec comme référence la biomasse suivie quotidiennement qui permet d'exprimer la ration en % de cette biomasse.

La teneur en protéines sarcoplasmiques et en acides aminés libres augmente avec l'intensité de la distribution aux poissons (en nombre de repas par jour et % de la satiété couverte), alors que la teneur en protéines myofibrillaires reste stable. La diminution des protéines liées à l'hydroxyproline indique que la proportion de tissus conjonctifs à base de collagène est diminuée lorsque les poissons sont nourris à satiété.

Les apports sont choisis en fonction des besoins en énergie des poissons (besoins d'entretien, besoins de croissance) qui varient avec la vitesse de croissance, la température et les pertes au cours de l'utilisation de l'aliment. Le taux de rationnement est déterminé par différents facteurs :

- liés à l'animal (espèce, souche, taille, stade et état physiologique),
- liés au milieu (température, salinité, qualité de l'eau, teneur en oxygène).

A partir du taux de rationnement, on peut calculer l'indice de consommation que l'on devrait obtenir. Il se calcule par la formule suivante :

$$\text{Taux de rationnement} = \text{Indice de consommation} * \text{taux de croissance spécifique.}$$

L'indice de consommation (IC) constitue un bon outil de pilotage de la gestion du rationnement et doit donc être finement suivi. L'IC doit en général être inférieur à 1. Pour son calcul, il faut faire attention à la précision des pesées, à l'intégration du poids des poissons morts et à la bonne comptabilité des effectifs.

Réduire les apports pendant la **période de pré-abattage** permet d'améliorer le rendement à abattage, de réduire la teneur en gras des filets et le gapping, d'améliorer légèrement l'intensité de la couleur et de modifier la texture des filets fumés. Les coûts de la diminution des poids et de la perte du rendement filet sont à comparer avec les économies d'aliment et l'élévation de la qualité des poissons (Olai *et al* (1999)). L'éleveur économise de l'aliment et obtient des poissons de qualité supérieure. Les poissons ont cependant perdu du poids et, contrairement au rendement d'abattage qui augmente, le rendement filet est altéré. Cette perte de valeur (diminution de la biomasse), est donc à rapprocher de l'économie d'aliment.

L'indice de consommation se calcule de la façon suivante :

$$IC = IC \text{ en début d'élevage} + (\text{augmentation de ce coefficient par kg de masse moyenne} * \text{masse moyenne du poisson})$$

Après ce bref exposé des principes de l'alimentation pratique des saumons, nous allons détailler deux particularités : l'alimentation en vue de l'abattage, et l'adaptation de l'alimentation en fonction des conditions environnementales.

a) Alimentation de préparation à l'abattage

Les matières grasses et les protéines sont les deux sources d'énergie mobilisées pendant le jeûne. Si les poissons sont soumis à une longue diète pendant la période hivernale, on note peu de variations de la composition corporelle mais une perte de poids, une diminution du rendement filet et une forme corporelle élancée. Une **mise à la diète** des saumons est habituelle pour que le tube digestif se vide avant l'abattage afin d'augmenter la qualité et la fraîcheur du poisson (dès 3 jours de diète, plus aucun aliment n'est retrouvé dans le tractus digestif). Cette technique a aussi été mise à profit dans la régulation de la production par les autorités Norvégiennes. En effet, la production sur les sites d'élevage est soumise à limitation du nombre de licences ou « droits d'exploitation d'un site ». Sur un site donné, une licence définit une biomasse maximale par an ou une quantité totale d'aliment distribuée.

Bien que le jeûne pré-abattage permette une élévation du rendement à abattage, les effets sur le rendement filet sont différents. Les poids relatifs de certaines zones des filets (zones A2, B et C) diminuent significativement lors du jeûne, alors que les autres zones ne varient pas (figures 34 et 35) :

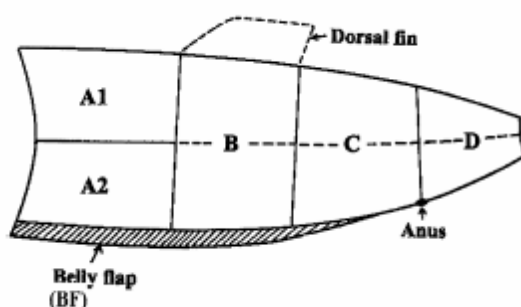


Figure 34 : Segmentation du filet en fonction des mesures de la distribution des teneurs en matières grasses. D'après Fauconneau *et al* (1990) et Olai *et al* (1998)

« Dorsal fin » : nageoire dorsale

De même, la composition d'un filet n'est pas homogène. En général, la teneur en matières grasses des filets diminue de la partie antérieure vers le segment postérieur et

de la partie ventrale vers la partie dorsale (d'après Fauconneau *et al* (1990) et Olai *et al* (1998)).

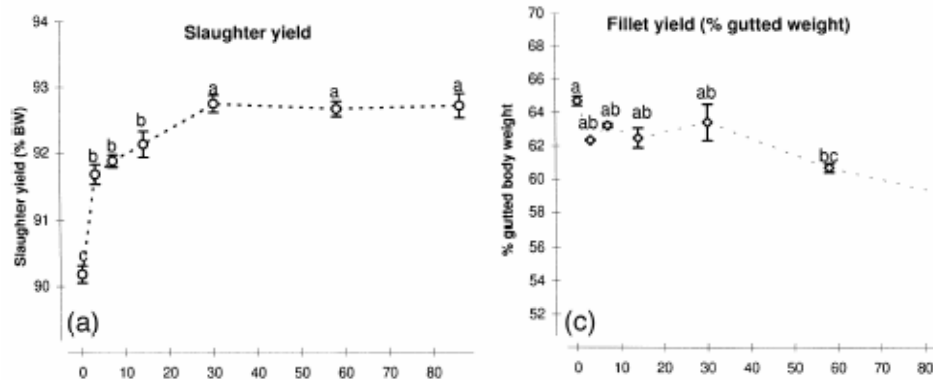


Figure 35 :
Rendement à abattage et poids éviscéré en fonction du nombre de jours séparant la diète de l'abattage. (Olai *et al* (1998))
« Slaughter yield » : rendement abattage
« Fillet yield » : rendement filet
« Gutted body weight » : poids net éviscéré

Le rendement à abattage augmente pendant les 30 premiers jours de diète, ce qui résulte d'une diminution plus rapide du poids des viscères que du reste du corps. La réduction du rendement filet à la suite d'un jeûne de longue durée résulte d'une diminution de la proportion du muscle par rapport aux arrêtes, aux nageoires et à la tête. Pour les abattoirs, une diète de 30 jours ou plus est bénéfique, mais pour les industries de filetage et de fumage le rendement filet est très altéré au-delà de 58 jours.

b) Ajustement de la ration en fonction de l'environnement

Le **besoin des poissons en oxygène** est directement corrélé à la quantité d'aliment distribuée. Au dessus de 5 à 6 ppm d'oxygène disponible, le poisson transforme d'autant mieux l'aliment que la concentration en oxygène est élevée, le coût énergétique du prélèvement de l'oxygène dans l'eau étant plus faible. La ration doit donc être réduite lorsque la teneur en oxygène de l'eau n'est pas optimale.

De nombreux agents peuvent limiter la disponibilité de l'oxygène pour le poisson : les agents portant atteinte à l'intégrité des branchies par colmatage (comme toutes les matières en suspension, le fer colloïdal) par nécrose ou hyperplasie (ammoniacque), et par hypersécrétion de mucus (pH acide, produits agressifs). La présence de ces agents doit également faire partie du suivi quotidien de l'élevage et de l'ajustement de la distribution d'aliment.

Les bactéries Rickettsia-like/Chlamydia-like sont associées au développement de la maladie des branchies. Le réservoir pathogène est vraisemblablement l'eau. Ces bactéries fécales sont excrétées par les poissons contaminés, avec certains coproduits du métabolisme bactérien. Les particules en suspension sont le support nutritionnel de la croissance de ces bactéries (d'après Beback-Williams (2003)). Cette maladie n'a pas de traitement efficace, les essais de traitement avec des antibiotiques donnent de mauvais résultats. La prévention passe par la le suivi et le maintien de la qualité de l'eau, la réalisation d'une quarantaine lors de l'introduction de poissons, la désinfection du matériel (eau additionnée de Javel). Un vaccin est en cours de développement pour la Piscirickettsiose du saumon.

c) Choix du mode de distribution

La **distribution de l'aliment** est réalisée de manière :

- manuelle : l'éleveur prend une quantité de granulés à l'aide d'une mesure et envoie les granulés à la surface de la cage par un mouvement de poignet.

- mécanisée qui permet une distribution fractionnée ou continue d'une quantité d'aliment déterminée par avance par l'éleveur. En mer, lors des périodes de faible courant et de teneur en oxygène faible, la distribution d'aliment peut être excessive. La combinaison des modes de nourrissage peut permettre d'optimiser les résultats et de limiter les pertes : la distribution automatique de 80% d'une ration calculée peut être suivie en fin de journée d'un repas à satiété avec contrôle visuel du comportement des poissons.
- distribution à la demande par un système de distributeur automatique de concentrés activé à la suite d'une sollicitation du poisson. Le délai de réponse aux sollicitations et le nombre de postes de distribution limitent le gaspillage et les phénomènes de compétition.

IV- EFFETS DE L'ALIMENTATION SUR LA QUALITE DES PRODUITS

A- Effet de l'alimentation sur la qualité de la chair et conséquences sur la santé humaine

La composition et la texture sont deux paramètres importants de la mesure de la qualité de la chair. Les problèmes les plus fréquents rencontrés en industrie de transformation sont une chair molle et du gaping. La teneur en MG est différemment appréciée en fonction des pays de commercialisation du poisson. Cependant, des teneurs supérieures à 16-18 % de MG sont unanimement reconnues comme trop grasses. De plus, la composition de la chair des poissons doit être prise en compte pour la santé humaine.

a) Texture

D'après Bourne (1982), in Bjornevik (2003), la texture se définit comme la réponse des sens tactiles à un stimuli physique résultant du contact entre une partie du corps et un aliment. Ce paramètre se mesure principalement par évaluation sensorielle humaine, mais quelques caractéristiques peuvent être quantifiées mécaniquement. On peut décomposer la texture en trois variables :

- mécanique qui correspond à une réponse de l'aliment à un stress (dureté, viscosité, jutosité et adhésivité),
- géométrique au travers des paramètres de taille et de forme,
- perception en bouche de la teneur en eau et en gras de l'aliment.

Les muscles grandissent par élargissement des fibres existantes(hypertrophie) ou augmentation du nombre de fibres (hyperplasie). L'hypertrophie persiste longtemps après que la croissance hyperplasique ait cessé. L'hyperplasie est plus prononcée dans les stades juvéniles précoces, puis diminue graduellement pour céder la place à la croissance par hypertrophie seule.

Le collagène modifie la texture qui devient plus ferme quand la teneur en collagène augmente. Au cours du stockage au froid, la chair de poisson s'attendrit. Au même moment, la solubilité du collagène musculaire est modifiée : la fraction insoluble et pepsino-soluble du collagène diminue alors que la fraction acido-soluble ne bouge pas. La teneur en collagène varie en fonction de l'âge, des saisons et de l'activité de nage des poissons.

La croissance se réalise par augmentation du diamètre et de la longueur des fibres musculaires et augmente donc le côté rugueux de la chair.

En hiver et au début du printemps, la teneur en gras des saumons diminue. Afin de pallier aux défauts organoleptiques d'une teneur en matières grasses trop élevée, les poissons peuvent être rationnés. Par une restriction énergétique des poissons, on parvient ainsi à améliorer la fermeté de la chair et à diminuer la jutosité et le degré de perception du gras en bouche. La fermeté est conditionnée par le pH du filet en période post-mortem, mais également par la teneur en protéines sarcopasmiques. Ces protéines sont des catalyseurs des modifications post-mortem des protéines myofibrillaires (Olai *et al* (1999)).

b) Gaping :

Lors de l'acquisition de la *rigor mortis*, la contraction des muscles encore rattachés au squelette peut provoquer une rupture entre le myotome et le myosepte. A des températures élevées, la contraction entraîne une rupture de la jonction cellule musculaire – myosepte qui résulte en une séparation partielle des segments musculaires et à la formation de creux dans les filets.

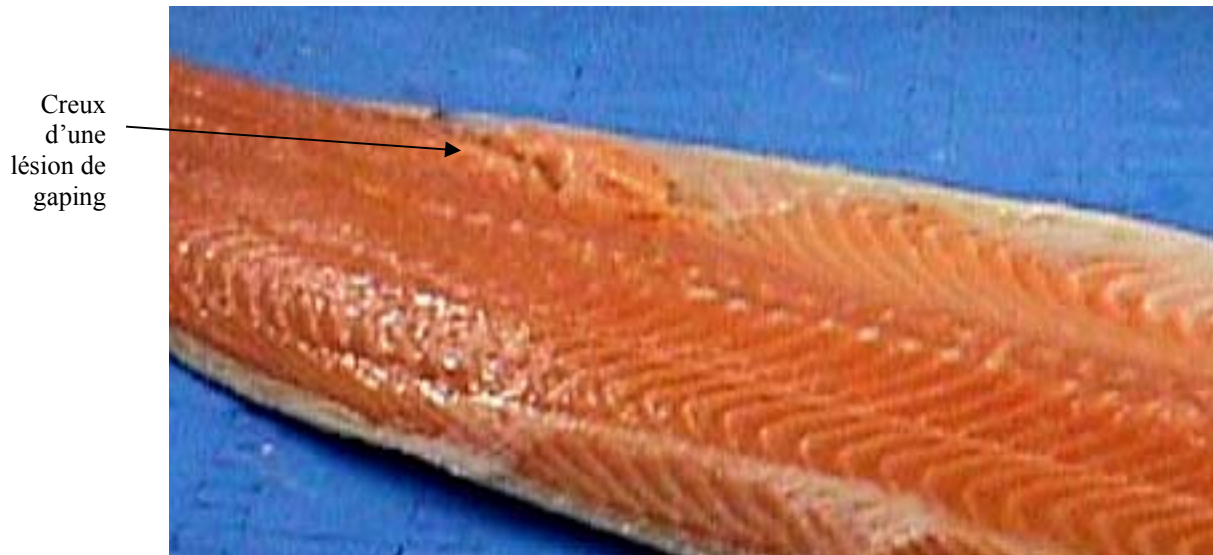


Photo 4 : Lésion de gaping sur un filet (source : auteur)

Peu d'informations sont disponibles sur les mécanismes biologiques de la dégradation de la texture et du gaping. La texture et la sévérité du gaping sont peu reliées à la composition de l'aliment. La texture molle et l'augmentation de la fréquence d'apparition du gaping sont plus fréquentes :

- chez des poissons nourris *ad-libitum* par rapport à des poissons rationnés,
- chez des poissons à fort taux de croissance,
- en fonction de la saison et sur ce point les avis divergent : plus en automne et en hiver (Nortvedt *et al* (2002), in Bjornevik (2003) ; Bjornevik (2003)), ou en été (selon Lavéty *et al* (1988) et Morkore and Rorvik (2002)).

Une chair molle et du gaping sont associés à une altération de la teneur et de la force des tissus conjonctifs. Le tissu conjonctif est composé d'une substance basale très hydratée, amorphe, où le collagène et l'élastine sont entremêlés. Les propriétés mécaniques du tissu conjonctif sont fonction de la taille, de l'orientation et des liaisons des fibrilles de collagène et fibres élastiques, ainsi que des proportions de composants annexes tels que des dépôts minéraux. Le collagène est stabilisé par des liaisons covalentes inter et intra molécules de collagène (Morkore (2004)).

Le gaping résulte de la diminution de la résistance du tissu conjonctif. Cette résistance diminue quand le pH post-rigor baisse lui aussi (en fonction de la saison, ce pH varie. Aux pics de gaping, le pH post-rigor est lui aussi inférieur à la normale). Le pH post-mortem des poissons est connu pour modifier les propriétés des filets telles que la texture du muscle, le degré de « gaping » et la capacité de rétention de l'eau. Comme le glycogène est transformé en lactate dans les conditions anaérobies survenant après abattage, la teneur initiale en glycogène est le facteur déterminant du pH final des filets. Chez le cabillaud, une diminution

de la teneur en glycogène avant abattage est à l'origine d'une diminution de la teneur en lactate et donc d'un pH final post-mortem plus élevé. Les niveaux trouvés lors de l'expérimentation (Olai *et al* (1998)) étaient similaires à ceux suivant un effort intense des poissons, et supérieurs à ceux de saumons matures attrapés en rivières.

Le gaping est diminué par le jeûne chez le cabillaud. Chez le saumon, la fréquence du gaping est supérieure en hiver et quand les pH post mortem sont élevés. Les faibles pH participent à attendrir des filets. La texture de filets crus stockés 4 jours sur glace est durcie lorsque les saumons sont soumis à un jeûne de plus de 58 jours (avec un pH post mortem plus élevé). De plus, une longue période de jeûne (> 58 jours) aboutit à un durcissement du tissu conjonctif. La force de tension du tissu conjonctif est moins dépendante du pH chez le saumon que chez les poissons maigres. La force que l'on doit appliquer pour rompre les fibres musculaires ou point de rupture, est plus faible pour des filets qui sont sujets au gaping ce qui traduit une moins bonne cohésion des myomères.

Une étude a montré que la fréquence du gaping était supérieure lorsque la teneur en matières grasses de l'aliment passait de 20 à 30% (d'après John Ian *et al* (2002)). Dans cette étude, le gaping a été corrélé à la cellularité des muscles, soit au nombre et à la distribution en taille des fibres musculaires. La densité des fibres musculaires varie entre 60 et 140 fibres /mm². Lorsque la densité est supérieure à 95 fibres /mm², peu ou pas de gaping affecte les filets (John Ian *et al* (2002)), cependant la cellularité n'est pas dépendante du ratio protéines /énergie de la ration.

Les saumons mis à l'eau en octobre (génération S1) ont une teneur en eau et en matières grasses inférieure et possèdent plus de fibres musculaires que les saumons de génération S0 (d'après étude TPA (2002)). Les saumons de génération S0 sont plus sportifs avec un métabolisme plus oxydatif (mesuré à partir de la teneur musculaire en créatine, en acide lactique et succinique), la dégradation de la chair se produit plus vite que les autres. Les saumons subissant un abattage à la ferme ont une texture de la chair plus ferme que les saumons transportés vivants jusqu'à un abattoir et donc soumis à un stress de plus longue durée (d'après étude TPA (2002)).

La distribution des diamètres de fibres musculaires, les teneurs en collagène et en protéines du cytosquelette dans les muscles sont trois facteurs intrinsèques déterminant le temps nécessaire à l'apparition de la rigor. D'autres travaux ont montré que le score de gaping est relié à l'étape de désintégration des liaisons entre le sarcolemme et la couche basale des fibres musculaires. La cellularité est un paramètre qui mesure les proportions et la répartition des composants structurels des muscles. Les protéinases jouent sur la solubilisation des composés structurels durant la période post-mortem, leur action sera donc plus ou moins facilitée en fonction de la cellularité.

Chez le saumon, le gaping est mal corrélé au pH final post-mortem. Dans l'ensemble, le gaping diminue quand le pH final diminue. Le collagène des saumons est moins sensible à de faibles pH. Le gaping est étroitement lié à la texture molle de la chair, ce qui coïncide avec une baisse du collagène insoluble, avec une chair plus sombre et plus rouge. Le gaping est également corrélé à la cellularité musculaire et diminue lorsque les muscles ont une densité en fibres supérieure à 95 fibres/mm². La cellularité varie peu en fonction de facteurs extérieurs : elle est conditionnée par la vitesse de croissance, par la génétique. Le stockage sur glace augmente l'attendrissement de la chair, l'incidence du gaping, le pH post mortem et diminue le collagène total et de type I. Le stockage qui

provoque le moins de gaping est le stockage dans des bacs d'un mélange eau/glacé pendant la période de *rigor mortis*.

Le syndrome GMD (Growth-associated Muscle Damage) correspond à des dommages musculaires liés à la croissance. Il doit être différencié du gaping. Il survient chez des saumons à croissance rapide chez qui la masse musculaire augmente plus rapidement que l'expansion des pourtours des myoseptes (d'après Olai (1999)).

c) Composition

La composition de l'organisme n'est pas affectée par la teneur en protéines de l'aliment. La teneur en protéines de l'organisme est plus élevée avec lorsque les saumons sont nourris avec un aliment dont la farine est grossièrement moulue (17% vs 16,5% avec une farine fine). Le dépôt de gras ne change ni avec le taux de protéines ni avec la taille des particules (Sveier *et al* (2000)).

D'après Olai *et al* (1998), la diminution de la valeur K (exprimée en %), correspondant à :

$$100 * (\text{Inosine} + \text{Hypoxanthine})$$

(Inosine MonoPhosphate + Inosine + Hypoxanthine))

Lorsque la durée de jeûne augmente indique que l'ATP est plus rapidement consommé chez les poissons nourris ad libitum que ceux mis à la diète. L'ATP est un indicateur qui traduit l'âge post mortem du poisson et la durée de vie de différents produits à base de poisson. Pour des durées équivalentes entre l'abattage et l'analyse, un poisson à jeun sera donc plus frais qu'un poisson nourri. Les composés IMP et hypoxanthine participent à la saveur du filet. L'IMP augmente la saveur et l'hypoxanthine génère des saveurs amères.

Les triméthylamines sont des indicateurs de la fraîcheur et de la décomposition du poisson. Au bout de 12 jours, aucune formation de ce composé n'a pu être détectée, indiquant que des saumons nourris ou mis à jeun pendant 3 mois se conservent 12 jours sur glace sans altération de leur fraîcheur. La formation de ce composé est cependant dépendante de la présence d'un germe d'altération *Pseudomonas putrefaciens* et de la surface de contact (poissons entiers vs filets) (D'après Olai *et al* (1998)).

d) Composition en acides gras

❖ Importance sur la santé humaine de la composition en acides gras

En Occident, les changements de mode de vie survenus dans le dernier siècle ont permis l'émergence de maladies chroniques telles que l'athérosclérose, l'hypertension, les diabètes... Le « gras » est passé au crible. En particulier les acides gras bénéfiques pour la santé, tels que les oméga 3 et 6 d'origine végétale et les oméga 3 à longue chaîne d'origine marine. Chaque acide gras a des fonctions et des effets physiologiques distincts. Autant l'effet bénéfique des acides gras à longue chaîne d'origine marine sur la prévention secondaire des maladies coronariennes est bien connu, autant l'efficacité de l'acide α linoléique (ALA, C_{18:3}, n-3) est controversé.

- Les poissons, par leur teneur élevée en n-3 poly insaturés, sont préconisés pour des personnes à risque de maladies cardiovasculaires ou d'arthrite rhumatoïde : l'acide linoléique

conjugué exerce des **effets anticarcinogénétiques** (par diminution de la synthèse d'acide arachidonique) et **antiathérosclérotiques**. Un apport suffisant en AGE oméga-3 exerce une activité antiagrégante plaquettaire et une activité antidysrythmique. Les AGPI à longue chaîne participent à la baisse de la triglycéridémie, à l'augmentation du cholestérol-HDL et la diminution des LDL-C et des VLDL.

- Les acides gras polyinsaturés de la série oméga 3 sont aussi connus pour leurs **effets sur l'immunité** : ils réduisent les concentrations de PG2 et augmentent la synthèse de PG3. Les AGE sont utiles dans les **pathologies inflammatoires** chroniques (rhumatismales, intestinales) ou aiguës. Jusque dans les années 60, les enfants recevaient quotidiennement une cuillère d'huile de foie de morue, apportée pour les vitamines A et D, et considérée comme un dépuratif et un reconstituant. Elle était apportée afin « augmenter la résistance des enfants ».

- Parmi les oméga 3, le DHA est connu pour son rôle essentiel dans le **développement du cerveau et de la rétine**, et l'EPA est indispensable à la production d'écicosanoïdes. Les AGE sont utilisés dans la prévention de **maladies de peau** comme l'acné, le psoriasis et de pathologies telles que l'**asthme**.

Des filières de productions animales se sont développées autour d'une supplémentation de l'alimentation de mammifères terrestres en oméga 3 afin que leurs productions soient plus riches en oméga 3 et donc meilleures pour la santé humaine (filières bovine, porcine et aviaire Bleu Blanc Cœur®). Le saumon est un poisson naturellement riche en oméga 3 et pauvre en oméga 6. Il fait donc partie des aliments bénéfiques pour la santé humaine en réduisant les apports d'oméga 6 et en apportant des acides gras oméga 3.

Les recommandations actuelles préconisent une consommation quotidienne chez l'homme de maximum 6.67 g/j d'acide linoléique (C_{18:2}, n-6), de 2.22 g/j d'acide α linoléique (C_{18:3}, n-3), de 0.65 g/j de DHA et EPA, avec au moins 0.22 g/j de DHA et 0.22 g/j d'EPA.

❖ Altérations de la qualité organoleptique

Selon Thomassen (1989), la substitution de l'huile de Menhaden par de l'huile de colza **modifie l'odeur de la chair** des poissons recevant cette alimentation. Le remplacement de l'huiles de hareng par de l'huile de tournesol **modifie l'arôme** de la chair des poissons qui sont issus de cette alimentation (en diminuant l'arôme poisson) (Skonberg *et al* (1993)).

L'odeur et l'arôme des poissons sont déterminés par la présence et la teneur en certains acides aminés et acides gras et en leurs produits de dégradation. Les composés aromatiques sont des alcools cétones et des aldéhydes issus de la dégradation d'acides gras polyinsaturés ou de composés azotés. La perception de ces composés est modifiée en fonction de l'huile utilisée (poisson ou HP, lin ou HL, soja ou HS). Chez la truite fario, les odeurs de frais, de piquant et de saumon caractérisent tous les lots. Les poissons nourris avec des aliments contenant des huiles végétales possèdent en plus une odeur de mousse, et sont caractérisés par une odeur de poisson cru, de coquillages et de crustacés. Le tableau 14 décrit les différents composés impliqués dans l'odeur finale de la chair.

Tableau 14, Composés odorants dans le muscle chez la truite fario en fréquence de détection (nombre de juges ayant détecté l'odeur). Les composés en rouge sont ceux qui participent activement à l'odeur de la chair de poisson. Les composés en gras sont ceux qui sont plus perçus chez les truites nourries avec des huiles végétales. D'après Regost *et al*, 2002.

IRL	Composés odorants	Méthodes d'identification	Description de l'odeur	Fréquence de détection		
				HP	HS	HL
1034	1-propanol	SM,IRL, standard	Solvant	1	4	1
1077	hexanal	SM,IRL, odeur, standard	Herbe coupée	2	5	8
1134	(E)-2-penténal	SM,IRL, standard	Herbe coupée	8	7	7
1236	(E)-2-hexénal	SM,IRL, standard	Champignon	4	6	7
1300	(E)-2-penten-1-ol	SM,IRL, odeur, standard	Champignon	5	6	7
1375	(E)-2-hexen-1-ol	SM,IRL, standard	Mousse	7	7	7
1500	(E,E)-2,4-heptadiénal	SM,IRL, standard	Vert, concombre	8	2	6
1535	2-nonanol	SM,IRL, standard	Frais, lacté	1	3	6
1588	(E,Z)-2,6-nonadiénal	SM,IRL, standard	Vert, concombre	4	6	6
1760	2-acétyl-2-thiazoline	SM,IRL, odeur	Noisette grillée	8	7	8

Le profil d'acides gras de l'aliment modifie le profil en acides gras de la chair et la qualité sensorielle (Waagbo et al (1991)). Les huiles de soja et de lin utilisées dans l'alimentation des turbots modifient la qualité organoleptique de la chair (odeur de patate et texture plus grasse). Le retour à des huiles de poisson permet de corriger ces défauts sensoriels. **Pour 3 mois de distribution préalable d'un aliment avec substitution par des matières premières végétales, 2 mois de retour à une alimentation à base d'huiles de poisson sont nécessaires** (Regost *et al* (2003)).

❖ Comment restaurer un profil d'acides gras intéressant sur le plan nutritionnel ainsi que la qualité organoleptique de la chair des filets de poisson?

Avec l'augmentation des productions aquacoles et la diminution des ressources marines, des sources alternatives plus durables d'acides gras ont été développées: les huiles végétales. La chaîne alimentaire marine a de fortes teneurs en EPA et DHA, alors que les huiles végétales sont riches en AGPI à 18 atomes de carbone. La chair des poissons nourris avec des huiles végétales est donc modifiée et tend à prendre un profil en acides gras proche des huiles utilisées. L'huile de colza en particulier présente de faibles teneurs en C_{18:2}, n-6 et C_{18:3}, n-3, et plus de C_{18:1}, n-9 qui est un des substrats préférentiels du saumon pour la production d'énergie. Elle présente l'avantage d'être disponible en quantité suffisante sur le marché, à un coût abordable. Le ratio C_{18:2}, n-3/C_{18:3}, n-6 d'aliments comprenant au moins 50% d'huile de poisson est supérieur à 1, ce qui reste intéressant pour l'alimentation humaine (ratio préconisé n-6/n-3 inférieur à 4, selon Torstensen *et al* (2004)).

Même nourris avec des aliments contenant exclusivement de l'huile d'olive ou de colza, les apports d'EPA et de DHA par la farine de poisson suffisent à combler les besoins en n-3 des saumons. Tous les saumons de l'étude de Torstensen *et al* (2004) permettaient de couvrir les besoins quotidiens d'un adulte en oméga 3 par une portion de filet de 150g, avant période de « lavage ». Cependant, la teneur en n-6 des filets était plus élevée chez des saumons nourris avec des huiles végétales. De plus, après **période de « lavage »**, c'est à dire de retour à un aliment 100% huile de poisson pendant 1788° jours (24 semaines), les rapports n-3/n-6 semblaient similaires entre les poissons ayant reçu auparavant les régimes 100% huile de poisson, 25% et 50% huile de colza, 50% huile d'olive pendant 42 semaines. Les poissons ayant eu des teneurs élevées d'huiles végétales avaient plus de C_{18:3}, n-3 et moins d'acides gras en C₂₀ et C₂₂, donc des proportions moins bénéfiques pour la santé humaine.

L'efficacité sur la qualité organoleptique et nutritionnelle de la chair d'une période de « lavage » en fin de période d'élevage de saumons nourris initialement à partir d'aliments contenant des huiles végétales a été mesurée : **3 semaines** sont nécessaires pour restaurer la saveur d'un saumon soumis à régime végétarien pendant les **18-24 mois** qui ont précédé. Une distribution alternée d'un aliment contenant des matières premières d'origine végétale puis d'un aliment tout poisson permet de diminuer la quantité d'huile de poisson utilisée pendant la vie du saumon de près de 85%. (Storebakken in Powell (2003)).

Pour un aliment contenant des huiles de colza distribué en premier lieu pendant 16 semaines, les profils d'acides gras oméga 3 reviennent à 80% de ceux des poissons uniquement nourris à base d'huiles de poisson au bout de **12 semaines** de distribution d'un aliment à base d'huile de poisson (valeurs relatives) (Bell *et al* (2003)).

Pour un aliment contenant des huiles végétales distribué en premier lieu pendant 50 semaines, les profils d'acides gras oméga 3 reviennent à 80% de ceux des poissons uniquement nourris à base d'huiles de poisson au bout de **20 semaines** de distribution d'un aliment à base d'huile de poisson.

En conclusion, nous pouvons constater que :

- la qualité organoleptique de la chair est modifiée par l'utilisation de matières premières végétales (goût, odeur..). La qualité nutritionnelle est affectée par la nature des acides gras distribués à certaines périodes clés.
- ces altérations peuvent être restaurées par un retour en fin de production à un aliment n'utilisant que des huiles de poisson pendant une durée variable selon la durée préalable de distribution de l'aliment « végétal », soit :
 - o 8 semaines pour 12 semaines de distribution d'aliment végétal,
 - o 12 semaines pour 16 semaines,
 - o 20 semaines pour 50 semaines,
 - o Label Rouge Océan Qualité : 26 semaines pour 43 semaines.

Dans les caractéristiques du Label rouge Océan Qualité, la durée de la période de « lavage » proposée est de **6 mois**, soit 26 semaines pour les saumons avant abattage, pour une durée totale d'élevage en mer de 16 mois minimum, dont 10 mois de distribution d'un aliment contenant des huiles végétales de colza ou de soja (ou 43 semaines). Ce qui répond aux durées recommandées dans la littérature pour modifier la qualité finale de la chair des saumons, tout en participant à la préservation des ressources marines.

La durée minimale de lavage présente une **marge de sécurité** par rapport aux chiffres annoncés dans d'autres expérimentations. Le rapport oméga 3/oméga 6 augmente donc par la combinaison de la diminution des oméga 6 et l'augmentation des oméga 3, cependant la diminution des oméga 6 est la partie qui demande le plus de temps.

❖ Effet de la diète pré abattage sur la qualité finale de la chair des saumons

Le **jeûne** a également un effet sur la composition : les poissons perdent des protéines et des lipides (mesurés en g par poisson), principalement mobilisés à partir des muscles, puis des viscères et du foie. Dans l'étude de Olai *et al* (1998), le foie contenait plus d'acides gras poly-insaturés des séries n-3 et n-6 et moins d'acides gras mono insaturés que les muscles et les viscères. Le « belly flap » contient 3 fois plus de gras que les autres portions du filet. Pendant le jeûne, la proportion d'AGPI n-3 augmente légèrement. Au contraire, lorsque les poissons sont **alimentés en continu** les teneurs en n-6 des filets et en AGPI augmentent

86 jours de jeûne ont des effets modérés sur les profils d'acides gras des filets, et plus prononcés sur le foie (réduction des EPA et augmentation du DHA et DPA). Pendant le jeûne, les activités des Δ_5 et Δ_6 désaturases, enzymes de désaturation et d'élongation ont été augmentées, l'activité de Δ_9 -désaturation a diminué (augmentation des $C_{16:0}$ et diminution des $C_{18:1, n-9}$). Le ratio phospholipides/triacylglycérol varie dans le foie, en conséquence d'une forte diminution de la teneur en lipides du foie chez le saumon à jeun. La composition en acides gras de la bande ventrale et des muscles reflète bien celle de l'aliment. Une période de **jeûne altère la teneur en acides gras du muscle brun** et modifie peu celle des muscles blancs.

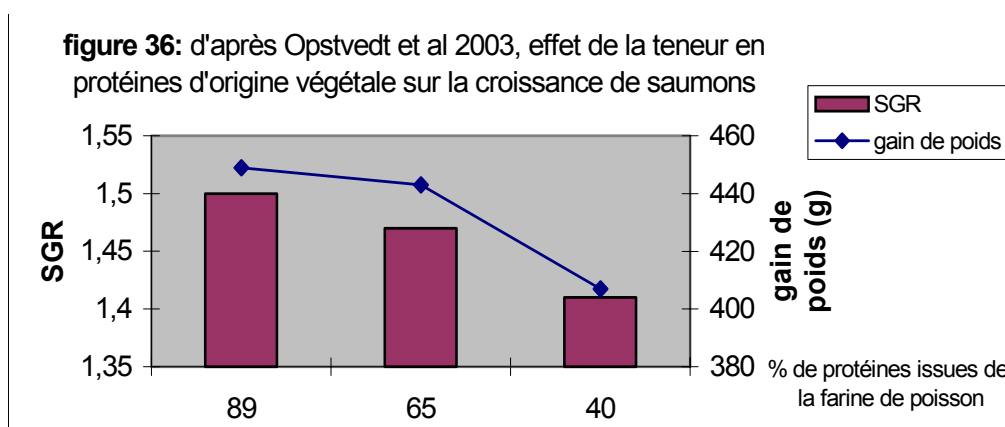
B- Effets de la substitution des farines et des huiles de poissons par des végétaux

On utilise de la lécithine et des matières grasses de végétaux (et occasionnellement de volailles) à la place des huiles de poissons, à cause de leur coût. Commençons par quelques considérations économiques : 140 millions de tonnes de lécithine sont produites annuellement. Leur coût est situé entre 0,30 et 0,44\$/kg, ce qui est moins cher que les huiles de poissons à 0,50\$/kg. Les matières grasses de volaille sont encore moins chères avec 0,22\$/kg. La lécithine possède une densité énergétique inférieure aux deux autres huiles, et apporte plus de cendres (8,3g/100g au lieu de <0,005) et de phosphore.

a) Effet métabolique

La diminution des teneurs en lipides des poissons nourris avec des aliments à base de lécithine est sans doute liée à la modification des proportions en acides gras, en phospholipides et en triglycérides dans l'aliment, ainsi qu'à la diminution du ratio n-3/n-6, de la quantité de DHA et à une teneur plus élevée en acide linoléique. De plus, avec un aliment contenant 15% de lécithine de soja et 5% d'huile de menhaden, les poissons présentent plus de gras dans les viscères, ce qui tend à diminuer l'efficacité de l'aliment car les viscères sont une partie perdue lors de l'abattage des poissons (Liu Kenneth *et al* (2004)).

Les aliments riches en farines de soja crues et entières diminuent nettement les performances de croissance. Le soja cru contient des inhibiteurs des protéases. Il diminue la digestibilité des protéines par les interactions avec les glucides. Même cuit, il engendre des lésions de l'intestin. Cet effet n'est plus observé lorsque les teneurs en soja dans l'aliment sont basses.



Lorsque la substitution des farines de poisson augmente, on enregistre, on observe (Opstvedt *et al* (2003)):

- une réduction de la croissance dose dépendante, (figure 36) : pour chaque % de farine de poisson substituée, la croissance diminue de 1,5g. Des substitutions inférieures à 20% de la farine de poisson ne semblent pas dégrader la croissance, alors qu'au-delà de 30% la croissance est fortement réduite.
- une diminution du facteur k,
- la digestibilité apparente des protéines diminue également linéairement,
- la digestibilité des glucides reste faible pour tous les aliments,
- la fixation des protéines (g/poisson) est légèrement réduite, mais la fixation des protéines/g de protéines consommées reste la même,
- le ratio d'efficacité protéique (gain de poids/ consommation de protéines) ainsi que la valeur nette des protéines (gain de protéines carcasse/consommation de protéines) diminuent,
- la substitution des farines de poisson n'a, dans cette expérience, pas eu d'effet sur la composition des poissons en humidité, protéines ou en cendres alors que la teneur en gras diminue linéairement,
- l'utilisation d'énergie pour la croissance baisse ainsi que le dépôt d'énergie.

Les poissons nourris avec des aliments contenant des protéines d'origine végétale sont plus gras, avec plus de dépôts lipidiques dans les viscères et un foie plus gros. D'autres études ont abouti aux mêmes résultats avec des aliments contenant 30% de farine de soja. Les différences de croissance observées avec des aliments contenant des végétaux ou non sont donc amplifiées si l'on considère les poissons éviscérés plutôt que les poissons entiers (Mundheim *et al* (2004)).

b) Effet pathologique

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les coûts élevés des protéines d'origine animale ainsi que la raréfaction des ressources marines ont amené à l'incorporation de protéines d'origine végétale telles que le soja dans les rations de poissons carnivores. Chez les poissons nourris avec un aliment contenant de la farine de soja, la capacité d'absorption des nutriments dans l'intestin distal est diminuée. En effet, l'absorption des nutriments via des transporteurs est diminuée et l'épithélium intestinal distal est plus perméable (Nordrum *et al* (2000)).

De plus, les farines de soja entraînent chez les saumons une **entérite de la région distale de l'intestin**, similaire à une réaction d'hypersensibilité. Cette entérite est caractérisée par les lésions suivantes :

- un raccourcissement des replis/ villosités primaires et secondaires de la muqueuse,
- un élargissement de la lamina propria qui est infiltrée par des cellules inflammatoires telles que des lymphocytes, des polynucléaires, des macrophages et des éosinophiles,
- une diminution, parfois jusqu'à la disparition, des vacuoles supra nucléaires et formation de vésicules microvillaires,
- une diminution de l'activité des enzymes de la bordure en brosse.

En conséquence, les digestibilités des protéines et des matières grasses sont diminuées, d'une part, à cause de l'inflammation et, d'autre part, par la présence de facteurs résiduels anti-trypsines du soja ou d'autres composés présents dans la fraction soluble dans l'alcool de la farine de soja. L'augmentation de l'absorption de différents acides aminés dans la portion distale du tube digestif chez les poissons nourris avec de la farine de soja ainsi que la diminution de l'activité des transporteurs suggèrent que cette modification de l'absorption serait liée à une inflammation entraînant une élévation de la perméabilité dans cette zone. Une

entérite de l'intestin distal peut, en effet, augmenter la perméabilité de la muqueuse via une augmentation de l'absorption passive (sans transporteur).

L'entérite distale induite par l'apport de soja dans la ration ne semble en général pas affecter la croissance bien que ces lésions anatomopathologiques soient accompagnées de diarrhées, de perturbations de la digestion et d'une légère réduction de la teneur musculaire en protéines. Cette entérite, induite par des apports de farine de soja dans l'alimentation, peut également être induite par l'apport des fractions osidiques du soja : 1 kg de soja cru contient 100 g d'oligosaccharides (sucrose, raffinose et stachyose) et 200 g de polysaccharides indigestibles solubles et insolubles. Ces composés entraînent un appel d'eau dans le tube digestif, à l'origine d'une diarrhée. Dans ce cas, l'entérite distale se manifeste par l'absence totale de vacuoles d'absorption et par une diminution de l'absorption des lipides (Refstie *et al* (2000)).

De plus, les **lectines** présentes dans le soja sont connues pour se lier à la membrane de la bordure en brosse du TD distal du saumon. Elles bloquent ainsi certains sites récepteurs.

C- Effet de l'alimentation sur la résistance aux maladies

a) Impact de l'alimentation sur l'apparition et la prévention des cataractes

Au cours de la dernière décennie, de plus en plus de cataractes ont été diagnostiquées chez les saumons d'élevage. Chez les poissons, comme dans d'autres espèces, la cataracte correspond à une dégénérescence des fibres du cristallin et à une prolifération de son épithélium. La cataracte est responsable de perturbation de la vision ou de cécité. Bien que ses origines soient multifactorielles, ce sont surtout les facteurs diététiques et environnementaux qui entrent en jeu dans sa genèse.

Comme le cristallin est avasculaire et dépourvu de fibres nerveuses (Il est constitué de cellules fibreuses très serrées, dérivées de la couche monocellulaire épithéliale), la gamme de réponse à des agents stressants est donc limitée.

La cataracte apparaît sur les saumons sauvages et d'élevage. Les **opacités les plus courantes sont rencontrées dans la zone postérieure**, plus ou moins étendues à la zone équatoriale. Dans les cataractes de faible score (0,5 à 1), les opacités sont principalement rencontrées **sur la corticale sous-capsulaire antérieure**, dans la région polaire, sous forme punctiforme ou circulaire. Dans les stades sévères, la majorité de la corticale ainsi que la région périnucléaire est atteinte, alors que des changements du noyau sont rarement rencontrés.

Dans un premier temps, les changements osmotiques du cristallin consistent en des opacités nuageuses mal délimitées au sein des fibres corticales de la région polaire antérieure, surlignant la ligne antérieure de jonction. Ces opacités ne sont pas retrouvées plus tard. Les cataractes osmotiques débutent par des changements transitoires, qui, s'ils sont récurrents, aboutissent à des cataractes permanentes suite aux dommages irréversibles subis par les fibres et l'épithélium du cristallin. Le **stress osmotique** est particulièrement intense au moment du changement de milieu de vie. Si les capacités physiologiques sont insuffisantes pour supporter ce changement de milieu, une cataracte réversible se forme à cause d'un déséquilibre osmotique (Breck *et al* (2003)).

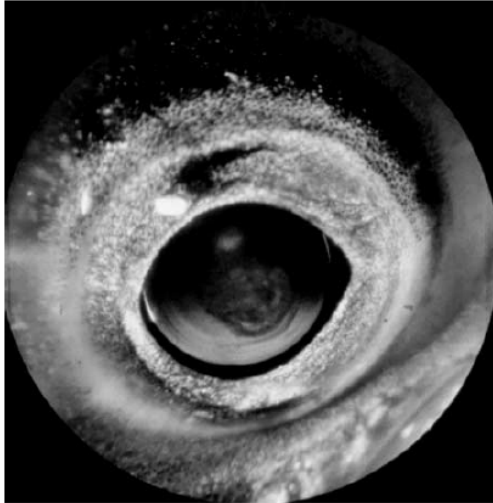


Photo 5 : Image d'une cataracte moyenne irréversible de score 1 (D'après Waagbo *et al* (2003).

Chez les saumons en eau douce, elle peut apparaître avant et pendant la smoltification. Chez les smolts de génération S0, le cristallin reste normal pendant les 8 à 10 premiers mois après le transfert en mer. Il s'opacifie ensuite, en liaison avec une élévation de la température et des taux de croissance. Chez les smolts de génération S1, elle se développe pendant les **phases intensives de croissance** l'été et l'automne qui suit le transfert, en parallèle avec des températures élevées et des taux de croissance spécifique supérieurs à 6% par jour. Une cataracte d'apparition rapide peut également survenir lors du deuxième été.

Tableau 18 : liste des principaux facteurs favorisant l'apparition de cataractes, classés en fonction de leur origine (environnementale et nutritionnelles)

Origines environnementales des cataractes osmotiques	Changements brutaux de température de l'eau Changements brutaux de salinité Radiations UV Super saturation en gaz Après transfert si les capacités physiologiques sont insuffisantes pour supporter le milieu marin hyperosmotique
Autres origines environnementales de cataracte	Toxiques tels que les organophosphates Agents infectieux tels que les « eyes flukes » (<i>Diplostomum spp</i>)
Origines nutritionnelles de cataracte	Déficience consécutive à des périodes de forte croissance Carence vitaminique en riboflavine Carence en tryptophane et méthionine Déficience en zinc primaire (alimentation pauvre) ou secondaire (formation de chélates ou compétition). Besoins élevés et croissance rapide.

❖ Mécanisme

Le **stress oxydatif** est un des éléments majeurs de la cataractogénèse. L'**histidine** et des composés tels que l'ansérine et la **carnosine** agissent au niveau du cristallin comme des antioxydants et des stabilisateurs des membranes biologiques. Or, les MP marines sont riches en histidine et en fer. De faibles teneurs tissulaires et sanguines en antioxydants et en zinc sont également des facteurs prédisposants. La superoxyde dismutase (SOD) est l'enzyme qui protège le cristallin des dommages oxydatifs. L'isoforme prédominante de cette enzyme dans le cristallin est la CuZnSOD. Toute carence en zinc diminue la teneur en CuZnSOD du

cristallin et le rend donc plus sensible aux stress oxydatifs. **Aussi, du Zinc doit être ajouté à la ration** pour prévenir l'apparition de ces troubles.

L'étape de smoltification correspond au passage d'une régulation hyper-osmotique à un état hypo-osmotique. Si l'on place des tacons (jeunes saumons d'eau douce), avant smoltification, en eau salée, on observe une cataracte liée au gonflement des fibres de la partie antérieure du cristallin. Des études précédentes ont montré que la prédisposition aux cataractes est liée à l'adaptabilité en eau de mer. Une supplémentation de l'aliment de 5% en sel avant transfert augmenterait l'adaptabilité en eau de mer (Bjerkas et Sveier (2004)). De plus, une augmentation de l'incidence de cataractes osmotiques réversibles a été concomitante de **l'élévation de la glycémie** des poissons et d'une **diminution des teneurs en vitamine E** (Bjerkas et Sveier (2004)).

Les **farines de sang de mammifères terrestres** sont les plus efficaces pour diminuer l'incidence et la sévérité de la cataracte chez le saumon Atlantique juvénile en eau douce, le smolt et l'adulte (eau de mer). Sur le plan épidémiologique, l'élévation des taux de cataracte dans les élevages de salmonidés a suivi l'arrêt de l'utilisation des farines de sang de mammifères terrestres interdites depuis le 1^{er} janvier 2001. Ceci prouve que la farine de sang a un rôle préventif sur des saumons de taille, de statut physiologique et de condition d'élevage différentes. Par rapport aux farines de poissons blancs couramment utilisées, les farines de sang sont très riches en histidine et phénylalanine. En dehors du fer dont la teneur moyenne dépasse 3000 mg/kg, les farines de sang contiennent peu de minéraux (macro et éléments trace) et de vitamines.

Paradoxalement, de hautes teneurs en fer (1200 mg/kg) dans l'alimentation augmentent la formation des cataractes, probablement lié à sa nature pro-oxydative (Waagbo *et al* (2003)).

L'effet des farines de sang peut être expliqué par deux hypothèses :

- soit l'étiologie de la cataracte serait liée à une déficience nutritionnelle en un ou plusieurs des composants présents dans le sang de mammifères,
- soit la cataracte observée est liée à d'autres facteurs nutritionnels ou environnementaux, mais un ou plusieurs des constituants de la farine de sang prévient, réduit ou arrête la formation de cataracte.

Un **aliment enrichi en fer (260 mg/kg vs 70 mg/kg), histidine (15 vs 9 g/kg) et en zinc (450 vs 136 mg/kg)** ou un aliment riche en farines de poissons et supplémenté en zinc permet également de diminuer l'incidence et la sévérité des lésions de cataracte (D'après Breck *et al* (2003)). Les souches de saumons à croissance rapide sont plus sensibles à l'apparition de cataracte. L'effet protecteur d'un aliment riche en histidine, fer et zinc est supérieur pour des souches à croissance lente. Les apports recommandés en histidine sont de 7-8g/kg d'aliment. Ils sont en fait vraisemblablement plus élevés dans des conditions d'élevage. En sus de son rôle dans la synthèse des protéines, l'histidine et ses dérivés sont des composés tampons et antioxydants dans les tissus des saumons ; dans l'œil, ils participeraient à l'homéostasie osmotique (Wall and Bjerkas (1999)). Dans la lentille, à partir d'acétyl coenzyme A et d'histidine, du N-acétyl-L-histidine est synthétisé. Cette molécule agit comme une pompe à eau régulant l'hydratation du cristallin.

De hautes teneurs en **vitamine C** et en **astaxanthine** ont un effet protecteur sur l'apparition des cataractes, alors que des teneurs élevées en lipides, en fer et en manganèse sont associées à une élévation de la prévalence des cataractes. Seul l'acide ascorbique a un effet protecteur

de l'apparition des cataractes. Il semble important d'équilibrer la ration des saumons entre les éléments prooxydants et anti-oxydants afin de protéger les saumons de l'apparition de cataractes. L'humeur aqueuse est le compartiment qui réagit le premier à une élévation de la teneur de l'aliment en vitamine C (200mg/kg), suivi de la rétine puis du cristallin (Waagbo *et al* (2003)).

La **taurine** est transportée activement vers le cristallin, et peut y être produite à partir de méthionine. Une des fonctions de la taurine est le maintien du volume des cellules en compensant les changements affectant les molécules intracellulaires à effet osmotique. De plus, la taurine a un rôle antioxydant servant à protéger les lipides de l'oxydation lorsque la vitesse de croissance est élevée et donc le besoin en micronutriments nécessaires au métabolisme accru. Une élévation de la teneur en lipides de l'aliment est un facteur prédisposant à l'apparition de cataracte car cela augmente la vitesse de croissance et donc le besoin en micro-éléments protecteurs de l'oxydation. De fortes teneurs en glucides favorisent également l'apparition de cataractes, en particulier par l'accumulation de sorbitol dans le cristallin.

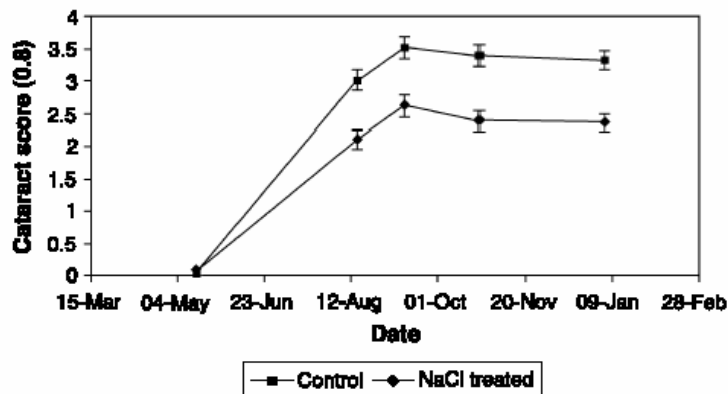


Figure 37 : Scores moyens de cataracte chez des poissons nourris avec un aliment témoin (« control ») et un aliment avec 5% de NaCl ajouté (« NaCl treated») en eau douce. Les scores de cataracte étaient plus élevés pour le groupe témoin ($p < 0,05$). D'après Bjerkas, (2004).

De même, une supplémentation en sel avant et durant la smoltification réduit la fréquence et la sévérité des lésions de cataracte (figure 37). L'effet du sel semble annuler celui de l'histidine (figure 38). A des teneurs de 10%, le sel réduit la croissance, alors qu'elle reste identique pour des teneurs en NaCl de 5%.

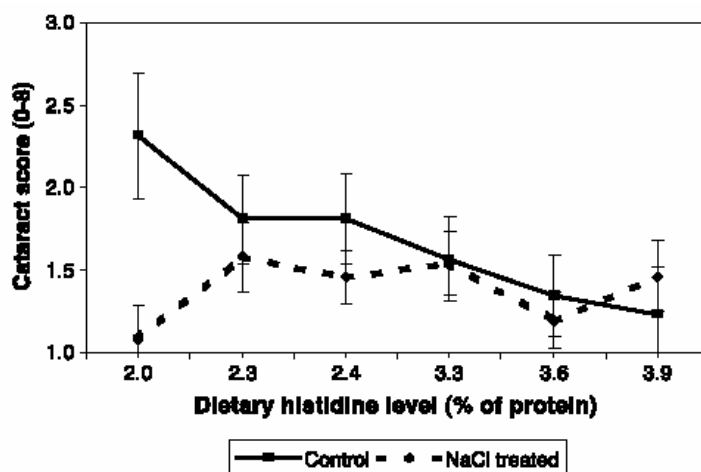


Figure 38 : Scores moyens de cataracte chez des poissons nourris avec un aliment témoin (« control ») et un aliment avec 5% de NaCl ajouté (« NaCl treated») en eau douce. En parallèle, l'effet de la teneur en histidine (% des protéines) a été mesuré. Les scores de cataracte étaient élevés pour le groupe témoin (histidine = 2%) et avec les plus faibles teneurs en histidine. Dans le groupe sans sel, l'histidine avait un effet préventif sur l'apparition des cataractes. D'après Bjerkas, (2004).

Les fluctuations de salinité de l'eau et l'élévation de la température sont des facteurs qui augmentent la prévalence des cataractes. Une élévation de température agit sur l'appétit des

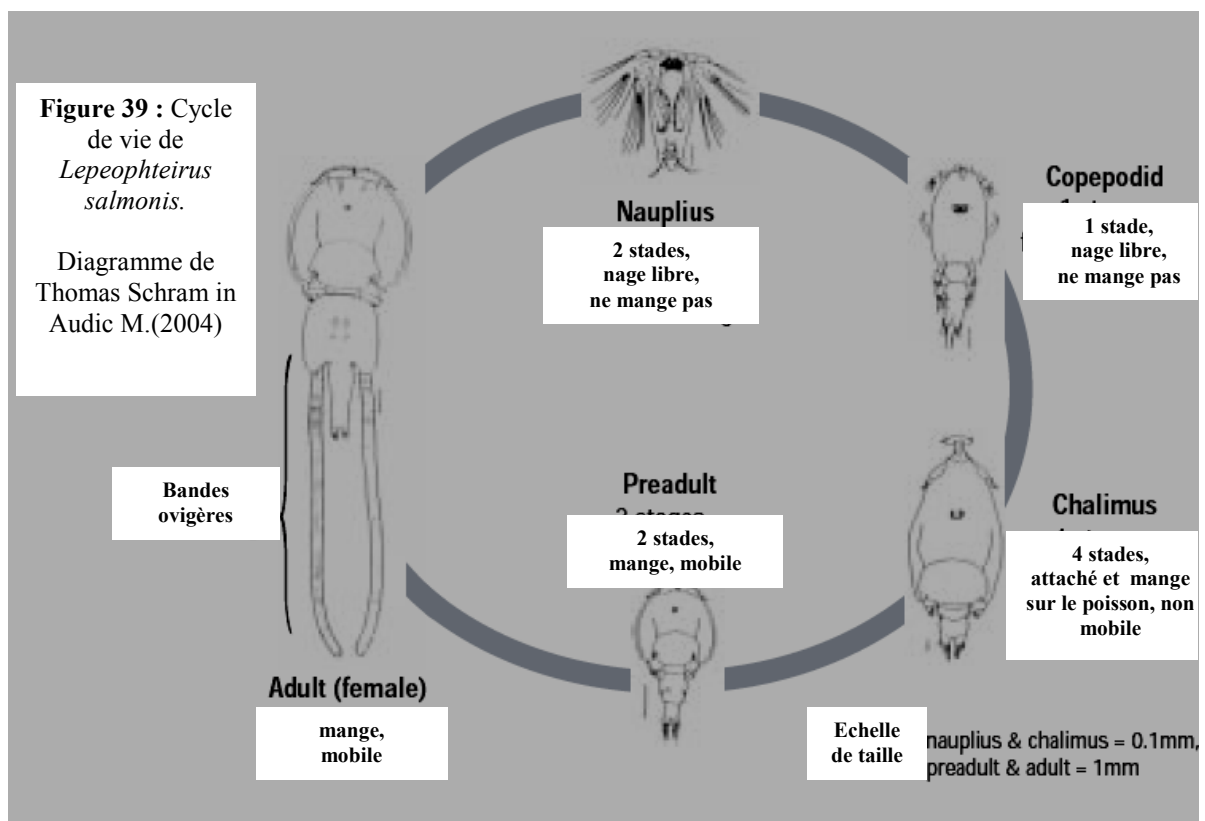
poissons et augmente la vitesse de croissance ainsi que la consommation des micro-éléments anti-oxydants et l'incidence des cataractes (Beurne (1978)).

b) Impacts de l'alimentation sur l'infestation par les poux de mer

Les poux de mer sont des parasites crustacés qui appartiennent à la famille des Caligidae. Les deux poux les plus fréquemment rencontrés sont *Lepeophtheirus salmonis* et *Caligus elongatus*. *Caligus teres*, ils occasionnent de nombreux problèmes au Chili. L'effet pathogénique augmente avec la taille, la mobilité et le nombre de parasites. *Lepeophtheirus salmonis* occasionne plus de lésions que *Caligus elongatus*.

Les copépodes (deuxième stade du cycle) entraînent une réaction locale visible (petites taches noires). L'alimentation des chalimus (troisième stade du cycle) génère des petites érosions locales. Des érosions plus extensives sont entraînées sur la nageoire dorsale de la truite de mer. Les adultes broutent à l'aide d'un appareil buccal de type racleur non spécifique. Aucune étude n'a permis de prouver l'existence de sécrétions enzymatiques.

Les lésions sont plus sévères en région de la tête, avec des érosions profondes. Les concentrations plasmatiques de sodium et de cortisol augmentent (stress), l'hématocrite, les teneurs en lymphocytes et en protéines plasmatiques diminuent.



On note une résistance non spécifique innée chez le saumon coho liée à une activité protéasique renforcée dans le mucus via la présence de sérine et de métallo protéases. Chez les saumons atlantique, les réponses immunitaires cellulaires et humorales sont limitées. Lors des essais de vaccination, l'immunité est induite expérimentalement par des anticorps anti-antigène d'intestin de poux, ce qui réduit la fertilité des femelles mais ne prévient pas l'infestation.

La réaction (production de cortisol) est moindre lors de la fixation des poux à des stades précoces. Des hypothèses ont été envisagées en ce qui concerne la capacité des poux à transmettre la furunculose, la vibriose, le virus de l'anémie infectieuse du saumon, la maladie bactérienne des reins. Les infestations parasitaires augmentent le stress et la susceptibilité aux autres maladies, provoquent un arrêt de l'alimentation, réduisent la croissance, augmentent la mortalité, diminuent la qualité des carcasses, augmentent les infections secondaires (tâches d'hiver) et occasionnent des surcoûts de production liés aux traitements.

Dans les fermes aquacoles, les pics d'infestation sont rencontrés en fin d'été et au début de l'automne. L'occurrence des deux espèces majeures de poux suit une variation saisonnière. La prévalence (% de poissons infestés) et l'intensité moyenne (nombre moyen de parasites par poisson) diminuent en hiver et augmentent en été (Schram *et al* (1998)). En mars, on ne trouve que des adultes de *Lepeophtheirus salmonis*. Quelques pré adultes apparaissent en avril. La proportion de formes chalimus n'a jamais dépassé 15%.

128 saumons ont été capturés en mer entre novembre 1993 et mars 1995 (Jacobsen et Gaard (1997)). La prévalence du portage de poux (*Lepeophtheirus salmonis*) était de 99,2%, avec en moyenne 29,5 poux par poisson. Ces 30 poux présents ne généraient pas de dommages sur leur hôte. Les évaluations antérieures estiment le portage de 8 poux par poisson en haute mer, et 20 poux par poisson dans les zones côtières.

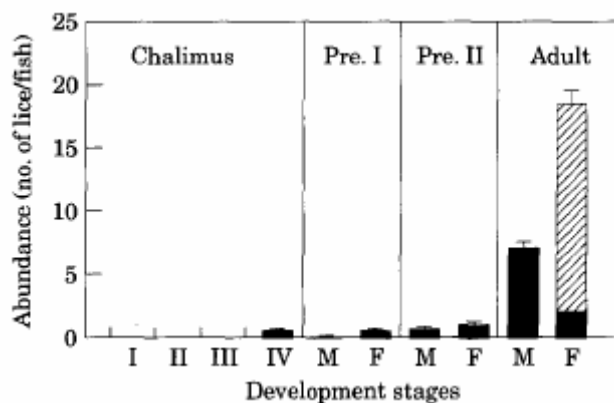


Figure 40 : Abondance de *Lepeophtheirus salmonis* sur 127 saumons de mars 1993 à mars 1995. Un saumon échappé a été retiré car il présentait une infestation atypique. Pre : préadulte. M : male. F : femelle. Les hachures correspondent à la présence de femelles ovigères. D'après Schram *et al*, (1998).

La majorité des poux étaient des adultes, et 72% de ces adultes étaient des femelles ovigères. Les poux adultes étaient présents depuis 3 mois. En effet, les femelles survivent sur les saumons en mer pendant l'hiver. La durée de vie des *Lepeophtheirus salmonis* est estimée à 10 mois. La population d'adultes ayant passé l'hiver est prête à pondre ses œufs dès le début du printemps. Le temps d'une génération est de 3 mois en automne (température moyenne 7°C) et 4 à 6 mois au printemps (température 3°C).

Les saumons qui s'échappent restent environ 3 semaines dans la zone de leur ferme. Or, dans les zones côtières, le nombre de poux infestant les saumons est plus élevé. Ces saumons fortement infestés ramènent donc un grand nombre de parasites en haute mer. Ils sont également plus infestés en endoparasites *Anisakis simplex*.

Les saumons sauvages ne restent dans les zones côtières que durant une période permettant le développement du copépode jusqu'au stade chalimus. Chez les saumons sauvages, la densité des poux est supérieure sur les générations S2 que sur les générations S1, ce qui indique que les parasites s'accumulent au cours de la période de vie marine, avec néanmoins une sorte de

stabilisation du niveau d'infestation. Le portage de poux de l'espèce *Caligus elongatus* est très faible.

Les poissons (type tanches), consommateurs de poux de mer, permettent de réduire significativement la présence des poux de mer sur les poissons. Cependant, seuls les stades juvéniles de ces poissons consomment les poux et ce uniquement dans les premiers jours de vie commune avec les saumons. Ensuite, ils consomment l'aliment en excès et s'attaquent aux yeux des saumons. Les tanches adultes ne mangent plus les poux. L'utilisation de ces poissons doit donc être limitée dans le temps. Leur utilisation est réservée à la fin du cycle de production, voire après le retrait des saumons pour épurer le site d'élevage.

La prévention usuelle des problèmes liés aux poux de mer passe par **l'addition d'iode** dans l'alimentation des jeunes smolts. Cette iode est apportée dans la ration en même temps que le sel, dans la période précédant la smoltification.

Une hypothèse a été avancée (source : Sté Europharma), elle n'est pour le moment pas vérifiée. Chez les saumons, une partie du glucose apporté par l'alimentation parvient à s'échapper par la peau, sur le même mode que la fuite de minéraux. Les sels sont de petites molécules, le glucose est une molécule beaucoup plus grosse qui ne parvient à passer que dans les zones les plus fines de la peau (avant la nageoire dorsale et après la nageoire anale). Chez les saumons sauvages, on trouve des poux tout le long du corps des poissons (en fonction du stade des poux). Chez les poissons d'élevage, les poux se localisent majoritairement dans les zones les plus fines de la peau. L'utilisation de farine de maïs comme liant dans l'alimentation des saumons est fortement incriminée dans ce phénomène. Les saumons nourris avec des **farines de blé** semblent moins infestés que ceux nourris avec des farines de maïs (étude non publiée). Des études restent à réaliser afin de vérifier l'attrait des poux pour des zones cutanées plus « riches » en glucose.

c) Effet de l'alimentation sur la résistance aux maladies infectieuses

Des saumons atlantiques ont été rationnés à des niveaux différents après une infection expérimentale par *Vibrio salmonicida*, agent de la vibriose d'eau froide (Damsgard *et al* (2004)). La **restriction alimentaire** affecte fortement la survie des poissons. Les poissons recevant une alimentation optimale présentaient un taux de survie de 64%. La survie des poissons restreints à 30% de la ration optimale ne dépassait pas 42,5% (celle des poissons témoins à la diète atteignait 98,8%).

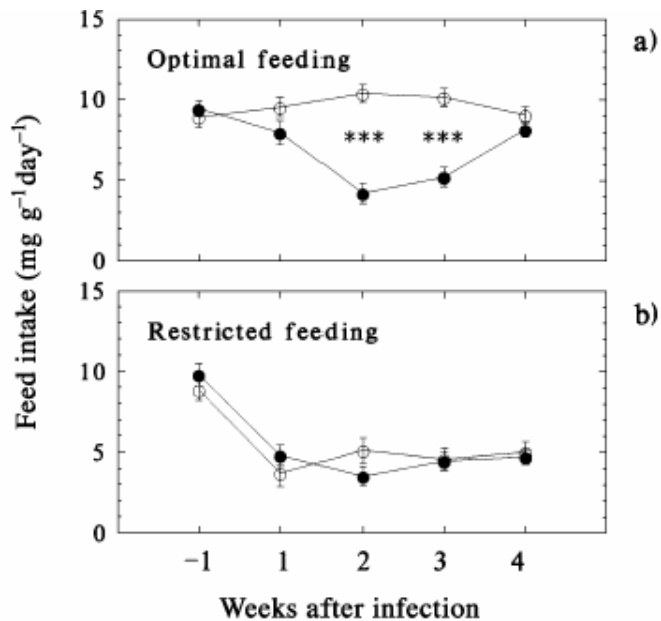


Figure 41 : Prise alimentaire en mg/g de poisson/jour chez des saumons atlantique infectés avec *V.salmonicida* (symboles pleins) comparée à des poissons non infectés (symboles vides). Le groupe a) de poissons était nourri de manière optimales. Le groupe b) recevait un régime restreint. Chaque point représente la moyenne \pm l'écart type avec $P < 0,001$. D'après Damsgard, 2004.

En général, l'appétit des poissons infectés diminue. La relation entre une maladie et l'appétit sont cependant complexes. Les effets sur l'appétit s'expliquent par une diminution de l'état général, des dysfonctionnements digestifs et métaboliques. Les restrictions alimentaires ont des effets controversés : elles engendrent soit une baisse des défenses générales de l'organisme (Blazer and Wolke (1984) dans Damsgard et al (2004)) qui sont consommatrices d'énergie ou d'autres ressources, soit, une augmentation (Colquhoun et Sorum (2001); Otto *et al* (1992) dans Damsgard et al (2004)). Certains régimes alimentaires, de même que des privations modérées influencent la santé des poissons et leur résistance aux maladies.

La vibriose d'eau froide est généralement caractérisée par de sévères hémorragies externes sous forme de pétéchies, un foie de jaunisse et anémique, des pétéchies au niveau des caeca et du gras abdominal, et la présence de fluides dans la cavité abdominale. L'usage de vaccins a permis la réduction de la prévalence de cette maladie.

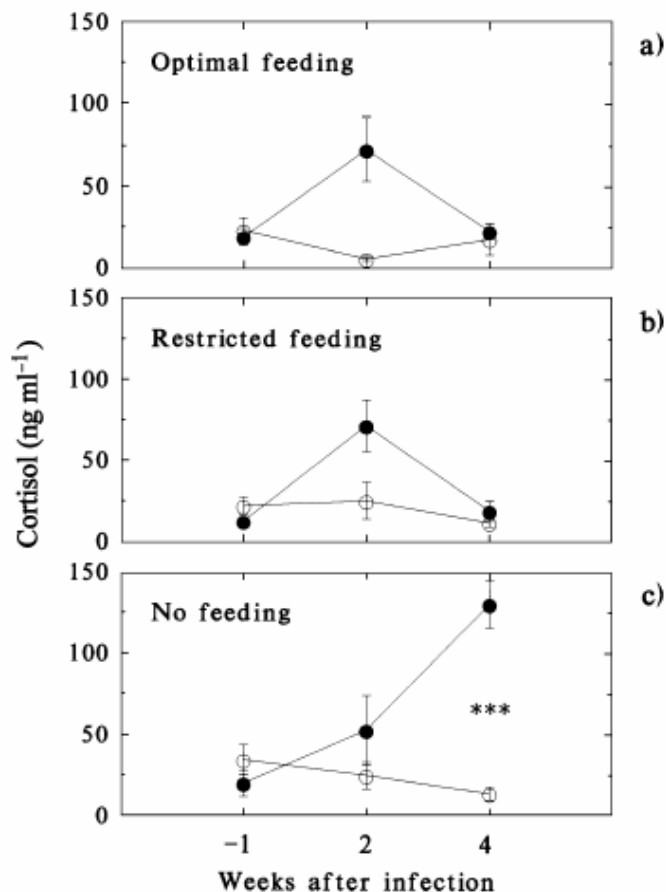


Figure 42 : Cortisolémie en ng/ml de saumons atlantique infectés avec *V.salmonicida* (symboles pleins) comparé avec des poissons témoins non infectés (symboles creux). Dans le groupe a) les poissons recevaient une alimentation optimale. Dans le groupe b) un régime alimentaire restreint et dans le groupe c) des poissons non soumis à infection. . Chaque point représente la moyenne +/- l'écart type avec $P < 0,001$. D'après Damsgard, 2004.

Chez les poissons infectés, les teneurs en cortisol augmentent pendant les deux premières semaines après infection (figure 42). Chez les poissons à jeun, les teneurs en cortisol 4 semaines après l'infection sont nettement supérieures à celles des autres poissons. **Le stress est à l'origine d'une diminution de l'immunité et de la résistance aux maladies.** Les niveaux de cortisol semblent plus influencés par l'infection que par les apports alimentaires. **Chez les poissons rationnés, les niveaux de cortisol sont également influencés par les interactions sociales et agressions au moment de la distribution des repas.**

Dans le cadre de cette étude, la diminution d'appétit ne se produit qu'à la 2^{ème} et 3^{ème} semaines après infection. Cette observation confirme des études précédentes indiquant que la diminution d'appétit ne se produit que lorsque le titre en agents infectieux est suffisamment élevé. Dans le cas d'autres pathologies comme la NPI, la diminution d'appétit ne se produit que quand les titres viraux sont déjà élevés. Pour l'infection par *Aeromonas salmonicida*, l'ingéré volontaire baisse de 25%, 14 jours après infection.

Dans cette partie, nous avons vu que l'alimentation a de nombreux effets sur les saumons. Les effets les plus visibles sont ceux qui concernent la qualité organoleptique et nutritionnelle finale de la chair des poissons. Les substitutions par des végétaux, importantes pour la préservation de l'environnement, ont des conséquences sur la composition de la chair des saumons ainsi que sur leur santé. L'alimentation est un facteur clef dans la maîtrise des pathologies les plus fréquentes en élevage (cataracte, poux de mer...). Une fois achevé le rappel des bases de la nutrition des saumons, nous pouvons maintenant aborder la création et la mise en pratique d'un nouveau référentiel de production Label Rouge.

V- EXPERIMENTATIONS A ECHELLE INDUSTRIELLE DES CARACTERISTIQUES FUTURES DU LABEL ROUGE

A. Introduction : principales exigences

L'objectif était de produire un saumon fumé de haute qualité. Pour ce faire, il fallait imposer des exigences sur la partie amont de la filière, de l'écloserie à l'abattoir pour produire une matière première de haute qualité, transformée par la suite selon des procédés eux aussi générateurs de haute qualité.

Un **saumon fumé de haute qualité** peut être défini de la sorte : bon d'un point de vue organoleptique, bon pour la santé, élevé selon des méthodes respectueuses de l'environnement, bon socialement et économiquement pour ceux qui le fabriquent et intégré dans une démarche de développement durable. Afin de produire un tel saumon, il faut connaître les paramètres organoleptiques intrinsèques de la matière première, du procédé et leurs facteurs de variation. Des seuils ont été fixés pour les éléments nutritionnels bénéfiques et les éléments nocifs. Les différentes méthodes envisageables pour une même étape d'élevage ont été sélectionnées sur la base de leur durabilité environnementale, de leur éthique sociale et économique. C'est donc la démarche de toute une filière mise en œuvre pour une production totalement tracée et contrôlée de saumons plus proches du saumon sauvage (croissance lente (16 mois en mer) et alimentation marine (78% de composés d'origine marine au minimum)) transformés par des procédés traditionnels (salé au sel sec, fumé au bois de hêtre, tranchage mécanique autorisé)

Les caractéristiques majeures du référentiel Label Rouge OCEAN QUALITE reposent sur deux maillons clefs : l'élevage en mer (alimentation et durée) et la transformation en saumon fumé. En début d'année 2004, un partenariat a été signé entre MERALLIANCE et la société norvégienne SALMAR. Cette dernière compagnie produit des saumons en incluant les étapes d'écloserie, nurseries smolterie, ferme d'eau douce, ferme en mer, abattage et première transformation. Pour en savoir plus, le site Internet de SALMAR se trouve à l'adresse : www.salmar.no. Il présente les activités du groupe, les principaux sites de production, l'organigramme de la société, et leur logiciel de traçabilité en ligne. La société MERALLIANCE est une société de salage fumage saumurage de poissons crus. Le site Internet de MERALLIANCE se trouve sur www.meralliance.com.

En s'associant, les deux sociétés ont créé une filière incluant l'ensemble des maillons de la chaîne de production. Ces deux acteurs sont tous deux fortement impliqués dans des démarches de management par la qualité intégrant le développement durable comme pilier de ce système. De ce partenariat est née le groupement « OCEAN QUALITE » qui est une association à but non lucratif (loi du 1^{er} juillet 1901). L'objet de l'association est de favoriser, de développer et de promouvoir la filière " produits de la mer qualité supérieure LABEL ROUGE OCEAN QUALITE " depuis la production jusqu'à la commercialisation des produits finis bruts ou transformés. Ses rôles principaux sont :

- la mise en place de référentiel (Saumon Label Rouge frais et fumé, et d'autres éventuels référentiels à venir),
- le conseil et le contrôle en rapport avec les référentiels,
- un rôle de promotion,
- un rôle de gestion.

Le première mission à l'origine de la création de l'association OCEAN QUALITE, est la mise en place d'un référentiel Label Rouge saumon entier et découpes, frais et fumé. Elle va être décrite ci-dessous.



Qu'est ce que le Label Rouge, et comment constituer un cahier des charges ?

Il était important, dans un premier temps de replacer les acteurs dans leur contexte afin de mieux cerner les motivations qui ont amené à l'élaboration d'un nouveau référentiel Label Rouge. Créer un **cahier des charges** incluant la production en amont nécessitait de maîtriser cette partie, au travers d'acteurs engagés, partenaires de cette démarche. Dans un référentiel Label Rouge, le groupement demandeur doit lister des « points de maîtrise » qui sont des paramètres, critères ou pratiques permettant de produire un produit fini de haute qualité.

En effet, le Label Rouge est un signe officiel de qualité et le fameux logo ovale rouge « LR » ne peut être apposé sur un produit qu'après homologation par la Commission Nationale des Labels et Certifications. La principale condition est qu'un produit Label rouge doit avoir fait la preuve de sa supériorité organoleptique par rapport à des produits standards et à d'autres produits à signe de qualité. Cette preuve est apportée par une **étude organoleptique** comparant une denrée produite selon les règles d'un référentiel candidat au Label Rouge et des denrées standards ainsi que des produits Label Rouge déjà présents sur le marché.

L'étude organoleptique est donc la pièce maîtresse d'un dossier Label Rouge. Cependant, il faut également prouver que les produits, tels qu'ils ont été dégustés, seront bien identiques à ceux proposés à la vente par la suite (constance dans la qualité). Tout comme un protocole scientifique permet à d'autres équipes de reproduire une expérience partout dans le monde et dans les mêmes conditions, un **référentiel** a pour but de décrire les conditions de production d'une denrée Label Rouge. Dans le **référentiel**, chaque étape de la production d'une denrée est décomposée en points de maîtrise. Chaque paramètre ayant une influence sur la qualité finale du produit sera décrit, avec des valeurs limites (température de fumage, temps de séchage, couleur de la chair...). L'ensemble des points de maîtrise réunis dans un référentiel a pour vocation de garantir la réalisation d'un produit fini de qualité supérieure.

Le référentiel ne peut être accepté que s'il est, en tout point, réalisable. Une **étude de faisabilité** accompagne donc un dossier de demande afin d'apporter les éléments économiques, techniques et scientifiques indispensables à la crédibilité du dossier.

Enfin, un Label Rouge doit être « accessible à tous ». Il ne peut être la propriété d'une seule entreprise (rôle du groupement défini par l'article L643-2 du code rural). Tout acteur doit pouvoir y entrer, y adhérer, sans conditions discriminatoires. Les **statuts de l'association** doivent être présentés afin de vérifier le respect des impératifs ci dessus décrits.

Toute demande de création d'un nouveau référentiel Label Rouge déposé auprès de la CNLC comporte donc les pièces suivantes :

- le cahier des charges ou référentiel,
- une fiche de synthèse,
- une étude organoleptique,
- une étude de faisabilité,
- et les statuts de l'association.

Le cahier des charges « Océan qualité », les grandes lignes

Pour chaque étape menant le saumon de l'œuf à la tranche, des points de maîtrise ont été détaillés au sein du référentiel saumon frais et fumé Label Rouge OCEAN QUALITE. Pour chacun de ces points, des critères ont été fixés sous forme de valeurs limites, de fréquences de suivi ou de mise en avant d'un savoir faire. Ces critères ont été élaborés à la suite de discussions entre les acteurs du Groupement, où chacun, à chaque étape, a apporté son expérience, son savoir faire et son faire savoir pour produire un saumon supérieur.

Les caractéristiques « certifiées communicantes » sont :

- **une croissance lente en mer (durée d'élevage en mer 16 mois),**
- **une alimentation contenant au minimum 78% de produits d'origine marine durant les six derniers mois,**
- **salé au sel sec,**
- **fumé au bois de hêtre.**

Ci dessous, les tableaux 19 et 20 récapitulent les principales caractéristiques constituant le référentiel saumon fumé et frais Label Rouge Océan Qualité, en les comparant à une production standard et aux deux Label Rouge existants auparavant : le Label Rouge frais SQS pour l'élevage et au Label rouge 04-94 pour le procédé saumon fumé.

L'alimentation de finition contenant 78% de composés d'origine marine est l'argument le plus innovant. Il prend en compte les recommandations nutritionnelles humaines des scientifiques (oméga 3) et les impératifs environnementaux en ciblant les périodes d'utilisation des composés marins afin de limiter la pression sur la ressource halieutique. Cet argumentaire est développé dans la fiche technique et dans les annexes aux observations, sur le référentiel.

Tableau 19 : Comparaison des pratiques en élevage des saumons (*Salmo salar*) selon les modes de production « standard », Label Rouge d'Ecosse (SQS) et référentiel Label Rouge OCEAN QUALITE.

Étapes	Objet de la maîtrise	Saumon frais standard : réglementation et usages	Saumon frais de qualité d'Ecosse sous Label Rouge (SQS) homologué	SAUMON FRAIS produit selon le référentiel OCEAN QUALITE
Toutes les étapes	Conditions d'élevage et bien-être des animaux	Pratiques variables concernant le bien être des animaux	Prise en compte du stress et de la souffrance des animaux	Sélection des sites d'élevage Modes de transports, les manipulations, l'environnement choisis afin de limiter le stress des animaux.
	Respect de l'environnement	Pratiques variables concernant la prise en compte de l'environnement	Pas de critère défini	Mise en place d'un système de management environnemental à chaque étape de la filière selon le référentiel ISO 14001
	Toxicologie	Pratiques variables	Pas de critère défini	Prise en compte des contaminants possibles de l'amont et du process: - Métaux lourds - Dioxine / PCB - Radioactivité, ... - Antibiotiques interdits
	Traçabilité	Traçabilité restreinte A partir du site et de la date d'abattage en général	Pas de critère défini	Traçabilité totale depuis l'œuf du poisson Traçabilité des aliments et des traitements vétérinaires
	Congélation	Congélation possible	Congélation interdite	Congélation interdite
Croissance en eau douce	Sélection des souches	Souches sélectionnées pour une croissance rapide	Pas de critère défini	Souches sélectionnées permettant une croissance lente particulièrement pour la phase marine.
	Densité eau douce	Pratiques variables	Pas de critère défini	Densité < 50 kg/m ³ pour les poissons de poids inférieur à 15 g Densité < 60 kg/m ³ pour les poissons de poids supérieur à 15 g
Croissance en eau de mer	Durée en mer	Peut être de moins de 10 mois Tous types de smolts	8 mois minimum Pas de critère sur les types de smolts	Durée d'élevage : minimum 16 mois (tolérance 15 mois pour les générations S1 en août de l'année N+3 ans après éclosion) Abattage avant maturité sexuelle Smolts S2 interdits
	Densité maximale	25 kg/m ³ .	15 kg/m ³ (tolérance 20 kg/m ³)	Densité maximum 20 kg/m ³
	Alimentation de finition des poissons en mer	Ingrédients marins < 65 %. Matières premières d'origine végétale (protéines et huiles) : 35 à 40 % Ratios oméga 3 / oméga 6 modifiés par l'ajout d'huile végétale. Aliments très énergétiques Protéines digestibles = 14 g/MJ Energie digestible Ratio oméga 3/ oméga 6 diminué par l'ajout d'huiles végétales	Equilibre entre teneur en protéines et en lipides. Pas de valeur définie	Aliment de finition composé au minimum à 80 % (tolérance à 78 %) d'ingrédients d'origine marine composé de farines et d'huiles de poisson. Teneur maximum en lipides : 35 % Energie digestible < 25 MJ /kg Riche en protéines : Protéines digestibles >15 g/MJ Energie digestible Rapport acides gras polyinsaturés oméga 3/oméga 6 > 3,3
	Colorants	Utilisation possible d'astaxanthine ou de canthaxanthine ou de mélange	Animaux âgés de 6 mois minimum Canthaxanthine ≤ 80 mg/kg d'aliment Astaxanthine ≤ 100 mg/ kg Mélange ≤ 100 mg/ kg	Uniquement en phase marine Canthaxanthine interdite. (directive 2003/7/CE du 24 janvier 2003) Astaxanthine ≤ 80 mg/kg d'aliment. Teneur en pigments dans la chair ≥ 5 ppm d'astaxanthine
	Traitements vétérinaires	Emploi d'antibiotique en préventif ou en curatif	Liste des antibiotiques autorisés	Emploi d'antibiotiques interdit.
Abattage	Mise à jeun avant abattage	Durées de jeûne très variables	7 jours minimum	Durée adaptée à la température de l'eau : 70°j 7 jours minimum, et maximum 20 j avant abattage
	Anesthésie	Pratiques variables	CO ₂	Refroidissement
	Abattage	En abattoir ou sur ferme	Possible sur ferme	Abattage sur site de la ferme interdit en Norvège, toléré pour les autres origines en cas d'impossibilité d'abattage à terre.
	Eviscération	En pratique jour de l'abattage, mais pas systématique en particulier en Ecosse	Délai de transport des poissons abattus sur le site d'eviscération < 6 h	En continu après abattage
	Délai emballage	Pratiques variables	Délai entre la récolte et la découpe 72 h maximum Pas de délai pour l'emballage	Poissons entiers emballés dans les 3 h après la pêche.

A toutes les étapes, la santé et la sécurité du personnel doit être assurée au travers du suivi des postures et attitudes de travail et de la prévention des troubles musculo-squelettiques. Les produits utilisés pour le nettoyage sont choisis pour leur faible nocivité sur l'environnement. Les rejets et les déchets sont maîtrisés. Les risques de contamination par les agents chimiques, physiques ou biologiques du milieu ou des aliments sont pris en compte

La sélection des souches génétiques comporte trois points de maîtrise : la sélection de saumons de l'espèce *Salmo salar* uniquement, non manipulés génétiquement, et issus de souches compatibles avec une croissance lente. Jusqu'à l'éclosion, les manipulations et l'éclairage sont réduits au maximum, la température est régulée et la saturation en oxygène est maximale (100% en entrée des bacs). En nurserie, les poissons reçoivent leur première alimentation minimum 250^j après éclosion, par petites quantités et en continu.

En eau douce, lors des tris qui sont des opérations stressantes pour les poissons les manipulations sont limitées afin de s'assurer que les poissons restent toujours dans l'eau. La densité maximale des poissons est limitée (tableau 19). L'aliment distribué aux poissons est garanti sans OGM, sans farine carnée d'animaux terrestres et sans colorant. La granulométrie et le mode de distribution de l'aliment sont choisis en fonction des besoins des poissons et de façon à limiter la compétition entre les individus. Le site est indemne de toute maladie réputée légalement contagieuse, inscrite à la liste I et la liste II des directives 91/67/CEE et 93/53/CEE. L'usage de facteurs de croissance et d'antibiotiques est interdit. Seuls les smolts de génération SO, S1 et S11/2 sont autorisés. Ils ne peuvent être transférés en mer qu'au-delà d'un poids de 50 g, et quand ils présentent les signes d'une complète smoltification.

Le **site d'élevage en mer** est sélectionné pour sa situation, sa profondeur, la salinité moyenne et les courants. La durée de la phase d'élevage en eau de mer est de 16 mois minimum. La densité maximale dans les cages est limitée à 20 kg/m³. Entre deux générations, un vide sanitaire de 6 semaines minimum assure la restauration de la qualité de l'eau et la diminution de la pression parasitaire du site. Les aliments sont tracés, et régulièrement analysés pour en vérifier la composition et l'éventuelle présence de teneur en contaminants tels que dioxines, métaux lourds et antiparasitaires. Après transfert en mer, qui est une étape stressante et souvent source de mortalité, les poissons reçoivent un aliment dit « de transfert », riche en protéines et minéraux et en appétant. Pendant au moins les six derniers mois de vie en mer, les poissons reçoivent un aliment composé de 80% d'ingrédients d'origine marine (tableau 19).

Tout au long de la période d'élevage en mer, la consommation d'aliment, la mortalité et la densité sont mesurées en continu ainsi que la croissance (suivi du poids des poissons et de son évolution) et la conformation ou facteur K. L'usage de peintures antifouling (peintures au cuivre évitant l'installation des algues) est déconseillé. Dans la chair, le rapport oméga 3/6 est strictement supérieur à 3,3. Les poissons sont mis à la diète au moins 70^j, au moins 7 jours, et au plus 20 jours.

L'abattoir respecte les guides de bonnes pratiques et possède une procédure de type HACCP. Des contrôles réguliers de contamination des surfaces sont réalisés avec recherche de *Listeria monocytogenes*, de flore totale et de coliformes fécaux. Afin d'assurer une traçabilité fiable, aucun mélange de lot n'est effectué à l'abattoir. La tranquillisation des poissons est assurée par un refroidissement d'au moins 30 minutes à 2°C, complété au besoin par une saturation du bain en CO₂. Les poissons sont triés après éviscération sur la base de leur poids et de l'absence de défauts (**Norme NBS 10-01** : quality grading of farmed salmon, Norwegian Industry Standard for fish disponible auprès de Norwegian Standards Association (Oslo, Norway)). Seuls les poissons « supérieurs » sont acceptés pour la production de poissons Label Rouge, les autres sont utilisés dans le circuit standard. Les poissons sont mis en glace dans les 3h suivant l'abattage et, avant toute opération de filetage, la température des poissons doit être inférieure à 4°C. Des contrôles microbiologiques sont réalisés sur les poissons et on recherche la présence de corps étrangers dans les caisses. Sur chaque caisse, une étiquette apporte les informations sur l'élevage, l'abattage, le calibre des poissons. Le numéro de lot doit permettre de retrouver l'ensemble de ces informations. Les caisses sont ensuite stockées et transportées à température contrôlée entre 0 et +4°C .

Tableau 20 : Comparaison des procédés de transformation des saumons fumés (*Salmo salar*) selon les modes de production « standard » régis par la norme NF saumon fumé V 45-065, le Label Rouge homologué n°04-94 et référentiel Label Rouge OCEAN QUALITE.

Étapes	Objet de la maîtrise	Saumon fumé standard : réglementation et usages, norme NF saumon fumé V 45-065	Saumon fumé Label Rouge Homologué n°04-94	SAUMON FUME LABEL ROUGE OCEAN QUALITE
Toutes les étapes	Respect de l'environnement	Pratiques variables concernant la prise en compte de l'environnement	Pas de critère défini	Mise en place d'un système de management environnemental à chaque étape de la filière
	Toxicologie	Pratiques variables	Prise en compte des contaminants du process	Prise en compte des contaminants possibles de l'amont et du process.
	Congélation	Pratiques variables	Congélation interdite	Congélation interdite
	Traçabilité	A partir du site et de la date d'abattage.	Traçabilité totale de la ferme jusqu'au saumon fumé	Traçabilité totale de l'œuf du poisson jusqu'au saumon fumé par ferme
Matière première	Calibre	Calibres variables	≥ 4 kg	3,5 à 7 kg
	Couleur Matière grasse	Filets : 13- 16 (Echelle Roche) Stries blanches marquées sur les poissons gras	≥ 15 (Echelle Roche) ≥ 25 (Echelle Salmo Fan) Absence de stries blanches	≥ 25 (Echelle Salmo Fan) Absence de stries blanches
	Matière grasse	Moyennes variables (10 à plus de 20 %) Pas de méthode fiable validée reconnue par la profession pour la mesure du taux de gras	10 à 15 %	Teneur en matières grasses de 10 à 17% en moyenne glissante sur 10 analyses. Selon la méthode définie dans la norme AFNOR NF V 04-403.
Filetage	Délai abattage-filetage	Pratiques variables	6 j maximum	6 j maximum
	Parage	Pratiques variables	Muscle brun absent	Muscle brun absent
Salage	Salage et taux de sel (Chlorure de Sodium NaCl)	Modes de salage rencontrés dans la profession : salage au sel sec, salage par injection de saumure ou opération mixte. Norme AFNOR NF V45-065 : taux de sel entre 2,5 et 3,5 % sans préciser le mode de salage.	Salage au sel sec exclusivement. Taux de sel : 2 à 3 %	Salage au sel sec exclusivement. Taux de sel compris entre 2,5 à 3,5% (moyenne glissante sur les 10 derniers résultats). Cette caractéristique est conforme à la norme saumon fumé NF V45-065. Minimum de teneur en eau résiduelle sera mesuré par la teneur en HPD : Le critère choisi est celui de la teneur en HPD < 74% , conformément à la Norme NF V 45 - 065
Fumage	Délai abattage-fumage	Pratiques variables	Délai abattage- filetage : 6 j maximum + délai filetage-fumage : 48 h maximum	Fumé dans les 7 jours maximum suivant sa pêche. Fumage traditionnel à froid. Délai entre dessalage et fumage : 24 h maximum.
	Perte de poids par séchage (salage + fumage)	Pas de perte de poids définie, Pratiques variables	1 % de perte de poids par heure de cycle de fumage (soit 4,5 % pour un cycle standard de 4h30) Pas de critère de perte pour les actions cumulées de salage et de fumage	Perte de poids de 9 % minimum par les actions cumulées de salage, de séchage et de fumage
Tranchage	Délai sortie fumage-tranchage	Pratiques variables, délai parfois supérieur à 15 j.	≤ 48 h	72 h maximum pour le tranchage frais 72 h + 24 h pour le tranchage raidi (avec garantie d'une descente rapide en 4h00 maximum à - 10°C à cœur) (réservé aux dés).
	Politique santé / sécurité au travail et tranchage	Tranchage mécaniquement essentiellement	Tranchage exclusivement manuel	Postures susceptibles d'entraîner des troubles musculo-squelettiques limitées Tranchage mécanique privilégié
Conditionnement et stockage	DLC	Variable jusqu'à 6 semaines ou plus Possibilité de congélation	21 j à partir de la date de conditionnement	21 j à partir de la date de conditionnement Validation annuelle* de la durée de vie

Les tableaux 19 et 20 dressent une liste non exhaustive des principales exigences du référentiel OCEAN QUALITE. L'ensemble des points de maîtrise (ou PM) est composé des PM 1 à 69 pour les étapes de l'élevage à l'abattage, et des PM 100 à 157 pour le procédé de transformation en saumon fumé.

Figure 43 : Le protocole de validation de la durée de vie des produits fumés est décrit en annexe 7 du référentiel, en voici le principe.

Objectif :

Validation de la date limite de conservation (DLC) et de la durée de vie (DV) pour le saumon fumé. Cette validation est réalisée annuellement et plus si changement de process et/ou d'origine.

Paramètres observés :

- Evolution bactériologique du produit pendant la DV
- Evolution de la qualité organoleptique du produit pendant la DV

Nombre d'échantillons :

Le jour de conditionnement, 40 plats sont prélevés et sont répartis ainsi :

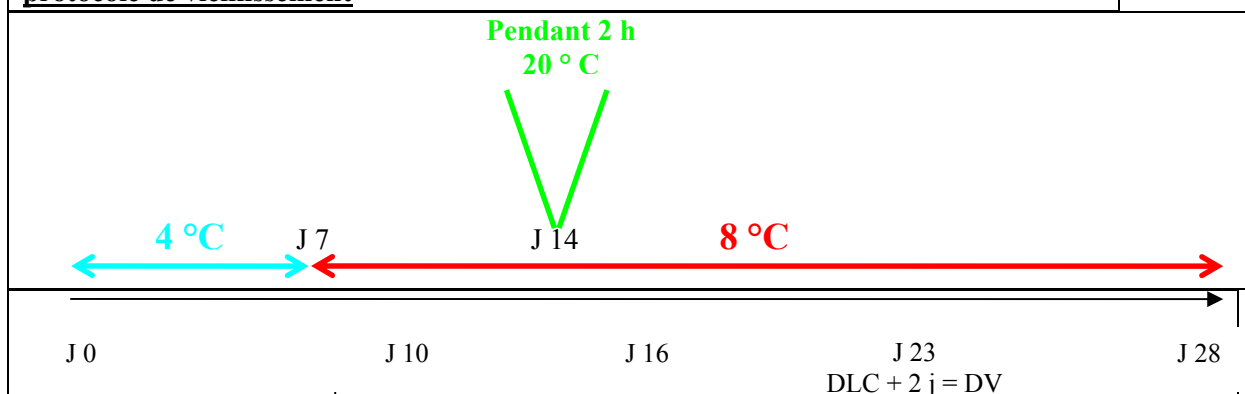
- 5x5= 25 plats mis en vieillissement pour analyses microbiologiques
- 5x3= 15 plats mis en vieillissement pour les tests organoleptiques

Un produit standard témoin (15 plats) peut être prévu pour les tests organoleptiques, dans ce cas il s'agit d'un lot de même origine, de parage et présentation comparables au Label et conditionné le même jour puis conservé avec et dans les mêmes conditions que le produit Label Rouge.

Protocole de vieillissement

Le protocole de vieillissement est réalisé dans des locaux ou chambre froide à température dirigée et enregistrée. L'ensemble des échantillons nécessaires aux analyses bactériologiques et aux tests organoleptiques est conservé dans un seul et même lieu dès sortie du conditionnement. Les produits analysés à J10, J16, J 23 et J 28 sont mis en vieillissement selon le protocole 1/3 de la DLC à 4°C puis 2/3 de la DLC à 8°C dont une rupture à 20°C pendant 2 heures.

protocole de vieillissement



Analyses Bactériologiques

Les germes recherchés sont les suivants : Flore Totale, Coliformes fécaux, ASR, Staphylococcus, Salmonelles et *Listeria monocytogenes* (recherche et dénombrement). Les analyses sont réalisées à J0, J10, J16, J23 et J28. A chacune de ces dates, 5 plats sont analysés.

Tests Organoleptiques

Les tests organoleptiques sont réalisés par un panel interne formé à la dégustation. La dégustation consiste en une dégustation de conformité ou un test de comparaison entre le plat Label Rouge et le témoin mis en vieillissement ensemble. Les feuilles complétées lors de la dégustation sont individuelles. Les tests sont réalisés à J0, J10, J16, J23 et J28. A chacune de ces dates, 3 plats (plus 3 plats témoins) sont dégustés.

Résultats et non conformités :

Une synthèse des résultats est réalisée. En cas de résultats critiques ou non conformes, une action corrective est ouverte et une validation de DLC est de nouveau réalisée.

B. Expérimentation « Grieg »

L'étude qui a été réalisée de janvier à juillet 2003 avait pour but de déterminer la faisabilité de production d'un saumon de qualité supérieure à destination du marché et du procédé de fumaison, avec une qualité significativement plus haute, et perçue comme telle par les consommateurs.

1. Protocole d'étude : matériel et méthode

Comme nous l'avons précisé plus haut, la volonté du groupement est d'améliorer la qualité à tous les maillons de la chaîne de production. Ainsi, les étapes d'élevage, d'abattage et de transformation ont été impliquées dans la bonne réalisation de cette étude.

❖ L'élevage :

Des essais d'élevage de saumons alimentés avec un aliment spécifique comprenant des matières premières essentiellement d'origine marine ont été réalisés pendant 6 mois dans une ferme appartenant à la société **GRIEG SEAFOOD**. Elle porte le nom de « Grieg Seafood Finnoy (Nordheimsoy) ». Elle est située à proximité d'Helgøysund, au nord de Stavanger en Norvège. Le site se trouve relativement loin de la côte, la profondeur oscille entre 100 et 170 m. La force des courants est supérieure à 0,1 m/s. La température moyenne de l'eau varie de 3 à 19°C selon la saison. Les cages sont de type « catamaran » et de dimension 25 m x 25 m, pour une profondeur de 20 m. 8 cages sont présentes sur le site au total. Le volume total de la ferme est de 100 000 m³. Les aliments sont stockés dans 4 silos. Chaque silo alimente deux cages par système de distribution automatique des pellets, individualisé pour chaque bassin et piloté par un système informatique. Sur la ferme, au démarrage de l'expérience, 500 000 poissons étaient présents au total.

Au cours de l'étude, les paramètres d'élevage ont été enregistrés en continu (température de l'eau à 10 m de profondeur, densité de la population dans les bassins, poids moyen des poissons, mortalité..).

Afin de comparer l'effet de cette alimentation riche en matières premières d'origine marine sur la qualité de la chair des poissons, un lot témoin a été suivi en parallèle du lot d'essai. C'est donc un lot initial issu de 3 écloséries différentes (Trosnavag, Hestag et Nedstrand) qui a été divisé à l'âge de 15 mois en deux lots de poissons de même âge et de poids moyen global toutes cages confondues équivalent. Ainsi les poissons sont issus d'une même souche, ont connu le même démarrage (conditions d'élevage, vaccination, et surtout alimentation). Au début de l'essai, les poissons vivaient en milieu marin depuis déjà 14 mois. La durée totale de leur phase marine au moment de l'abattage était donc de 20 mois.

Tableau 21 : Principales caractéristiques de la période pré-smoltification des saumons de l'étude.

Différentes étapes :	Sélection	Souche : Aquagen standard
	Ponte	13 décembre 2000
	Eclosion	3 janvier 2001, soit 512 °j au total
	Elevage en eau douce	16 février 2001, soit 800 °j au total
	Transfert en eau de mer	3, 8 et 16 novembre 2001 (souche S ₀ : début phase marine en automne)
Prophylaxie	Les poissons ont été vaccinés contre	- Aeromonas salmonicida - Vibrio anguillarum - Vibrio salmonicida - Vibrio viscorus - Nécrose Infectieuse Pancréatique

Le lot témoin a reçu une alimentation « standard », aliment Ocean 2500© (Ewos, Bergen, Norway), tout au long de l'étude. Le lot essai a été, lui, nourri par une alimentation marine de la semaine 10 à 29 en 2003. Les deux lots vivaient dans des bassins différents mais toujours au sein de la même ferme. Chaque semaine, un échantillonnage des poids moyens était réalisé. Deux séries de mesures ont été réalisées sur 8 poissons par cage au démarrage de l'expérimentation à 3,8kg, afin d'effectuer des profils de composition de la chair et de suivre

l'évolution de leur qualité en rapport avec l'alimentation (février, mai). Un profil d'acides gras a été réalisé à réception des lots dans l'entreprise de fumage.

Tous les jours, la consommation d'aliment a été enregistrée ainsi que la température de l'eau à 3, 6 et 10m de profondeur.

Tableau 22 : Alimentation des deux groupes étudiés : les saumons du groupe essai et les saumons témoin.

Identification des bassins	Lot essai		Lot témoin
	1	5	Bassins 2, 3, 4, 6, 7 et 8
Nombre de poissons	81000	90000	
Poids moyen (10 mars 2003) en kg	2,7	2,6	2,791
Alimentation fournie par :	Ewos		Ewos
Formule de l'aliment, en % :	Ocean Quality		Ocean 2500
Huile de poisson	22,8		25
Farine de poisson lot 2	10		
Farine de poisson lot 1	46		
Huiles végétales	0		7% huiles végétales
Gluten de maïs	0		contient aussi du gluten de maïs
Blé	14,1		25% (blé, soja
Gluten de blé	5		et gluten de blé)
Mono-ammonium Phosphate	1,5		1,1
Minéraux	0,21		0,21
Vitamines	0,1		0,1
Astaxanthine	60 ppm		50 ppm
Matière première origine poisson total:	78,8%		60-65 %
Protéines / Lipides :	47 / 30		38 / 40
MG	30,5 à 37,2%		40%
protéines	42 à 45%		38%



Figure 6 : Photographie des bassins d'élevage de la ferme de Stavanger, site de réalisation de l'essai.

❖ L'abattage :

L'abattage s'est déroulé sur deux jours consécutifs (jeudi 3 et vendredi 4 juillet 2003) pour les deux lots, dans le même abattoir (abattoir R114) afin de maintenir les lots dans des conditions similaires. Pour faciliter le repérage de chaque lot, le numéro du bassin d'origine a été reporté sur chaque caisse contenant les poissons éviscérés, avec une puce de couleur bleue identifiant les poissons " essai ".

❖ La transformation :

Après abattage, les saumons ont été livrés sur les sites industriels de **MERALLIANCE**© (Quimper, France) pour y être transformés en saumon fumé. Chaque lot a été divisé en plusieurs groupes homogènes afin de tester plusieurs types de procédé de transformation, et de choisir celui offrant le plus haut niveau de qualité.

Six types de procédés ont été évalués :

- procédé classique (sans peau) dont le tranchage est fait mécaniquement, sans étape préalable de raidissage (Témoin 7).
- procédé classique (avec peau) dont le tranchage est fait à la main, sans étape préalable de raidissage (Témoin 5).
- procédé classique (sans peau) dont le tranchage est fait mécaniquement, avec étape préalable de raidissage (< 4h) (standard LABEYRIE).
- procédé Label Rouge (avec la peau), dont le tranchage est fait à la main. Selon le référentiel Label Rouge homologué n°04-94 (CNLC, ministère de l'agriculture) (Témoin 8).
- procédé candidat au Label Rouge « Océan qualité » (avec la peau), dont le tranchage est fait mécaniquement sans raidissage (essai 6).
- procédé candidat au Label Rouge « Océan Qualité » (avec la peau), dont le tranchage est fait mécaniquement avec raidissage (essai 1).
- Darnes de saumon frais candidat au Label Rouge.
- Darnes de saumon frais standard.

Après transformation, nous avons obtenu 8 groupes de produits, qui ont été comparés entre eux ainsi qu'à des produits extérieurs à l'étude (un produit Label Rouge n°04-94 et un produit standard représentatif du marché).

A livraison en France, des échantillons ont été prélevés afin d'effectuer une analyse finale de la composition de la chair des poissons, ainsi que des analyses microbiologiques et toxicologiques.

❖ La dégustation : le protocole ADIV

Après transformation, les produits ont été soumis à des tests de dégustation sur jury entraîné en interne, ainsi qu'une analyse sensorielle réalisée par l'**ADIV MARKETING**© (Clermont-Ferrand, France, accrédité Cofrac), et composée d'un profil sensoriel par un jury entraîné de 12 experts et d'un test hédonique par un jury de 120 consommateurs. *Le détail du protocole et des résultats du profil sensoriel réalisé par l'ADIV font l'objet d'un document intitulé "Analyse sensorielle" annexé au dossier Label Rouge Océan Qualité.*

Les tests consommateurs ont été réalisés entre le 23 et le 25 juillet 2003. Chaque consommateur a été soumis à comparaison de 4 produits. Les consommateurs ont été triés en tant que consommateurs réguliers de saumon fumé et acheteurs de produits ayant un signe de qualité. Les produits ont été présentés successivement dans un ordre aléatoire. Pour chaque produit, un questionnaire comportait une note sur 10 pour permettre l'expression d'opinions très différenciées, des questions ouvertes pour permettre l'expression du jugement par des réponses libres, des échelles d'attitudes en 5 points, selon la norme NF XP V 09-500. La comparaison globale des résultats des références a été réalisée par le test de Kruskal-Wallis. La comparaison des résultats des références 2 à 2 est réalisée par le test de Mann-Whitney.

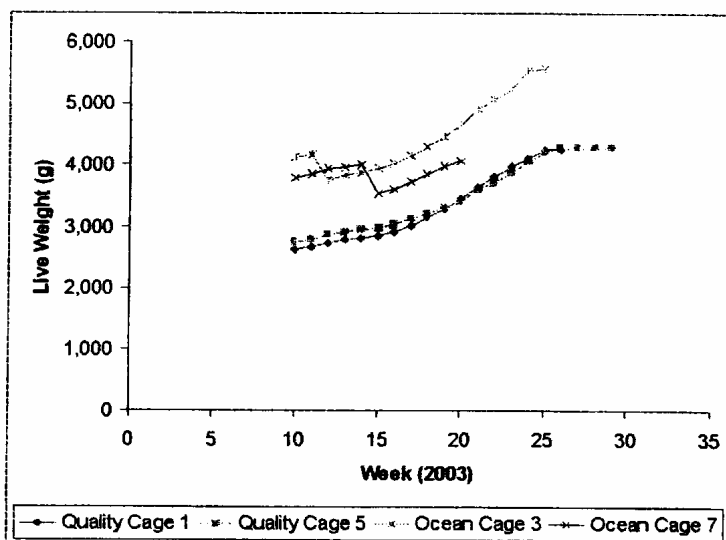
L'analyse sensorielle s'est déroulée le 24 juillet 2003 sur un groupe de 12 sujets qualifiés et entraînés sur la famille produit « saumon fumé ». Les produits ont été présentés en

monadique* séquentielle (présentation d'un seul produit à chaque fois) avec contrôle de l'effet d'ordre, de report et des conditions de présentation (température de service, quantité...). Les profils descriptifs ont été mesurés sur des échelles d'intensité en 7 points (selon les normes NF V 09 002, NF V 09 006, NF ISO 8586, NF V 09 105, NF V 09 015, NF ISO / CEI 17025). La comparaison des résultats de l'analyse sensorielle a été réalisée par une analyse de variance (ANOVA) à un ou deux facteurs, complétée si besoin par un test de Student. La comparaison des résultats des références 2 à 2 a été réalisée par les tests de PLSD Fisher.

2. Résultats et discussion

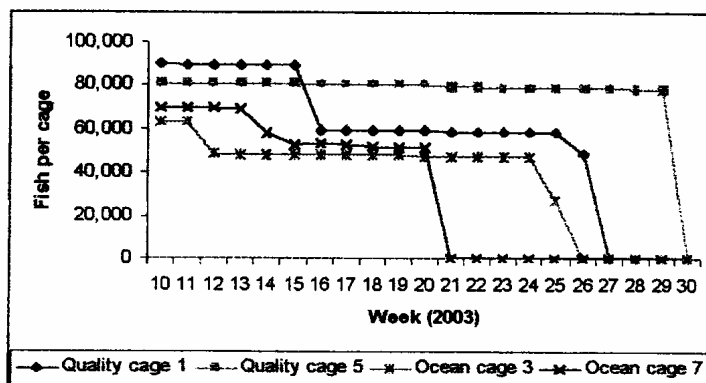
❖ Elevage

Figure 44 : Evolution des poids au cours de l'essai (« live weight » = poids vif en g, « Week » = semaine).



Dans cette étude, le poids moyen des deux lots, toutes cages confondues était équivalent. Cependant, il existait des différences entre cages, en particulier à cause des étapes de « grading » ou séparation par poids. Les marches visibles sur les courbes correspondent à l'opération de grading* qui modifie le poids moyen par cage selon que l'on retire les plus gros ou les plus petits poissons. Les poissons des cages 1 et 5 ont débuté à des poids différents de ceux des cages 3 et 7, et cette différence s'est maintenue tout au long de l'expérience. Le poids vif a donc dû être considéré dans l'analyse de la composition des poissons car cette dernière évolue en fonction du poids.

Figure 45 : Nombre de poissons par cage et par semaine, mettant en exergue les différents tris par poids ou « gradings » dans les cages 1, 3 et 7 dans les semaines 15, 11 et 13 respectivement.



La baisse du poids vif des cages 3 et 7 était probablement lié à une grande diminution du nombre de poissons de cette cage. Dans la cage 1, le nombre de poissons diminuait nettement en semaine 15 mais le poids vif restait constant.

La pente finale des courbes correspond au retrait des poissons pour abattage.

❖ Qualité de la chair

Les paramètres qualité ont été mesurés au début et à la fin de l'expérimentation. En raison des différences de poids vifs entre les groupes, les analyses ont été menées de façon à annuler l'effet du poids vif, en utilisant une analyse de covariance (ANCOVA). Les résultats sont décrits dans le tableau 19.

Tableau 23 : Résultats comparés de la qualité de la chair des poissons (l'ANCOVA qui permet d'ajuster les poids vifs entre cages).

Paramètre	date	<i>Océan 2500</i> Témoin Moyenne ajustée	<i>Océan Quality</i> Moyenne ajustée	Standard error	P value	
					Paramètre	Poids vif
Facteur k	Février	1.34	1.38	0.029	0.345	0.001
	Mai	1.25	1.35	0.019	0.013	<0.001
Pertes à éviscération (%)	Février	12.16	12.86	1.638	0.788	0.601
	Mai	12.74	12.53	1.122	0.897	0.591
Matières grasses (%)	Février	16.89	17.88	0.598	0.304	<0.001
	Mai	15.87	15.12	0.324	0.115	<0.001
Pigments (ppm)	Février	6.18	5.82	0.306	0.462	0.286
	Mai	5.93	5.74	0.249	0.596	0.665

A partir du tableau 23, on voit qu'au départ de l'essai, il n'y avait pas de différences significatives entre les traitements, une fois que le poids vif avait été pris en compte. Cependant, en mai, le facteur k des poissons nourris avec l'aliment *Océan Quality* était significativement plus élevé ($p < 0.05$) que ceux nourris avec l'aliment *Océan 2500*. Aucun autre effet n'a été observé : la teneur en matières grasses étant, dans les deux cas, sujette à plus forte influence de la variation individuelle que de la teneur en matières grasses de l'aliment.

Tableau 24 : Analyse des scores de couleur mesurés en fin d'expérimentation, présentant les scores minimum, médian et maximum et les résultats d'une analyse de différence par le test de Mann Whitney U.

aliment		Echelle de couleur Roche		SalmoFan	
		Février	Mai	Février	Mai
Ocean 2500	Min	15	14	25	24
	Médiane	15	15	27	26
	Max	16	16	28	28
	Score cumulé	310	314	277	266.5
Ocean Quality	Min	13	14	23	24
	Médiane	15	15	26	26
	Max	16	16	29	28
	Score cumulé	218	214	251	261.5
'p Value		0.039	0.549	0.054	0.923
significatif		<0.05	NS	NS	NS

Le tableau 24 montre qu'il n'y a pas de différence entre la couleur de la chair des groupes de poissons à la fin de l'expérience, alors qu'une légère différence était présente au début. Cependant, aucun ajustement pour le poids vif n'a pu être fait dans ce cas. La distribution des scores était étroitement similaire entre groupes à la fin de l'étude.

❖ Qualité physico-chimique de la chair

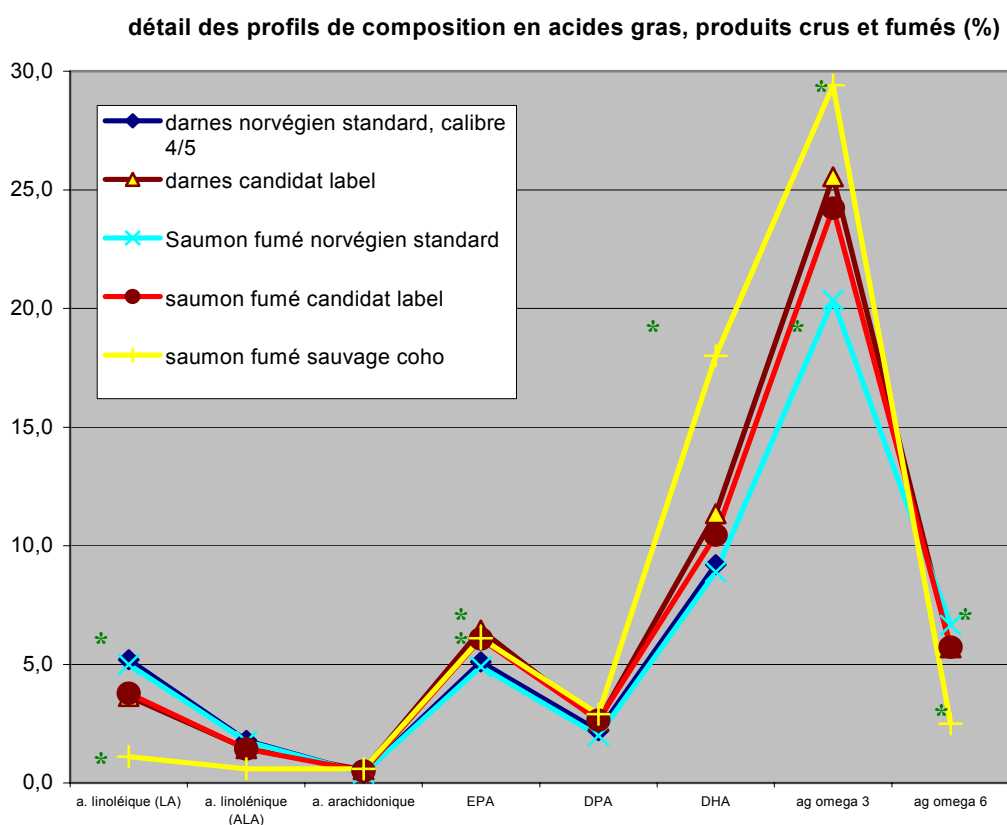
Le suivi des profils d'acides gras a fait l'objet d'une analyse détaillée. Le tableau 23 présente les profils en acides gras de la matière grasse corporelle des différents lots de l'étude : lots standards du commerce, lots témoins élevés comme des saumons standards, lots candidats au Label Rouge et saumon sauvage. Le prélèvement a été réalisé selon la norme NQC (Norwegian Quality Cut) NS 9401 de 1994 (Norwegian Standards Association, Oslo, Norway).

Tableau 25 : Profils des acides gras des poissons appartenant aux différents lots de l'étude (prélèvements de juillet 2003, à la fin de l'expérimentation). Les résultats sont exprimés en % de la matière grasse.

	C18:2, n-6	C18:3, n-3	C20:4, n-6	a. écosa-pentaénoïque	C22:5, n-3	a. docosa-hexaénoïque	Total		rapport omega 3/ 6	
	a. linoléique (LA)	a. linoléique (ALA)	a. arachi-donique	EPA	DPA	DHA	n-3	n-6		
MP	Darnes norvégien standard, calibre 4/5	5,2	1,8	0,4	5,1	2,2	9,2	21,2	7,0	3,0
	Darnes témoin , calibre 4/5	4,6	1,5	0,5	6,0	2,8	9,7	23,9	6,6	3,6
	Darnes candidat Label, calibre 4/5	3,6	1,4	0,6	6,3	2,4	11,6	25,3	5,6	4,5
	Darnes candidat Label calibre 3/4	3,7	1,5	0,5	6,6	2,8	11,1	25,8	5,8	4,4
	Témoin 3 norvégien standard	5,3	1,8	0,4	4,7	2,0	8,9	20,2	7,0	2,9
	Témoin 10 norvégien standard	4,7	1,7	0,4	5,1	2,0	8,9	20,5	6,3	3,3
	Saumon fumé témoin 9	4,4	1,5	0,5	6,6	2,9	11,0	25,9	6,5	4,0
	Témoin 5	4,4	1,5	0,6	6,6	3,1	11,0	26,1	6,5	4,0
	Témoin 2	4,1	1,4	0,6	6,8	3,1	10,8	25,8	6,3	4,1
	Témoin 7	4,2	1,5	0,6	7,0	3,2	10,7	26,2	6,5	4,0
fumé	Saumon fumé candidat Label essai 4	3,9	1,4	0,5	6,0	2,6	10,6	24,5	5,8	4,2
	Saumon fumé candidat Label essai 6	3,9	1,5	0,5	6,1	2,6	10,5	24,2	5,8	4,2
	Saumon fumé candidat Label essai 8	3,6	1,4	0,5	6,1	2,7	10,3	23,9	5,7	4,2
	Saumon fumé candidat Label essai 1	3,7	1,4	0,5	6,1	2,7	10,4	24,3	5,6	4,3
MP moyenne	Saumon fumé sauvage Coho	1,1	0,6	0,6	6,1	2,9	18,0	29,4	2,5	11,8
	Standard	5,2	1,8	0,4	5,1	2,2	9,2	21,2	7,0	3,0
	Label	3,7	1,5	0,6	6,5	2,6	11,4	25,6	5,7	4,5
	Standard	5,0	1,8	0,4	4,9	2,0	8,9	20,4	6,7	3,1
	Label	3,8	1,4	0,5	6,1	2,7	10,5	24,2	5,7	4,2
fumé moyenne	Sauvage	1,1	0,6	0,6	6,1	2,9	18,0	29,4	2,5	11,8

Le graphique 46 montre que les produits candidats au Label Rouge tendent à avoir un profil en acides gras et un rapport oméga 3/oméga 6 intermédiaire entre les saumons standards et le saumon sauvage, que le saumon soit cru ou fumé.

Figure 46 : Représentation graphique des profils en acides gras des saumons frais (darnes) et fumés regroupés en lots standard, candidat au Label Rouge, et sauvage. Les termes “ ag oméga 3 ” et “ ag oméga 6 ”, correspondent respectivement à la somme des acides gras de type oméga 3 et oméga 6 présents dans le produit. D’après les résultats présentés dans le tableau 25. Les écarts types respectifs par acide gras sont : 0,97 pour le LA, 0,27 pour l’ALA, 0,07 pour l’ARA, 0,66 pour l’EPA, 0,38 pour le DPA, 2,14 pour le DHA, 2,42 pour les oméga 3 et 1,07 pour les oméga 6. l’* représente les valeurs statistiquement significatives.



Ces courbes confirment le fait que les profils d’acides gras du saumon frais ne sont pas modifiés par le procédé de transformation (fumage à froid). De plus une tendance se dégage nettement : le saumon candidat au label tend à se rapprocher du saumon sauvage en terme de composition en acides gras et présente un profil en acides gras intermédiaires intermédiaire entre le saumon sauvage et le saumon standard (LA, oméga 3 et oméga 6). Le saumon candidat au Label et le saumon sauvage sont différents du saumon standard pour l’EPA et le DPA.

Pour l’analyse statistique, nous avons choisi de regrouper les lots de poissons par type d’alimentation (standard, vs Label, vs sauvage). Le test consistait en une analyse en composantes principales à test de sphéricité de Bartlett, avec étude d’une matrice de corrélation de Pearson.

Tableau 26 : Analyse statistique des profils en acides gras des différents lots de poissons : 1- moyenne et écart type entre les lots. 2- matrice de corrélation : les poissons candidats au Label ont une corrélation de 99,7% avec les saumons standard et 93,33% avec le saumon sauvage. *En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,050$ (test bilatéral).*

Au seuil de signification $\alpha=0,050$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation significative entre les variables. Autrement dit, la corrélation entre les variables est significative.

	Moyenne	Ecart-type
Standard et témoin	6,589	6,634
Label	6,661	6,972
Sauvage	8,111	9,365

Matrice de corrélation :

	Standard et Témoin	Label	Sauvage
Standard et témoin	1	0,997	0,906
Label	0,997	1	0,933
Sauvage	0,906	0,933	1

Test de sphéricité de Bartlett :

Khi ² (valeur observée)	53,546
Khi ² (valeur critique)	7,815
ddl	3
p-value unilatérale	< 0,0001
Alpha	0,05

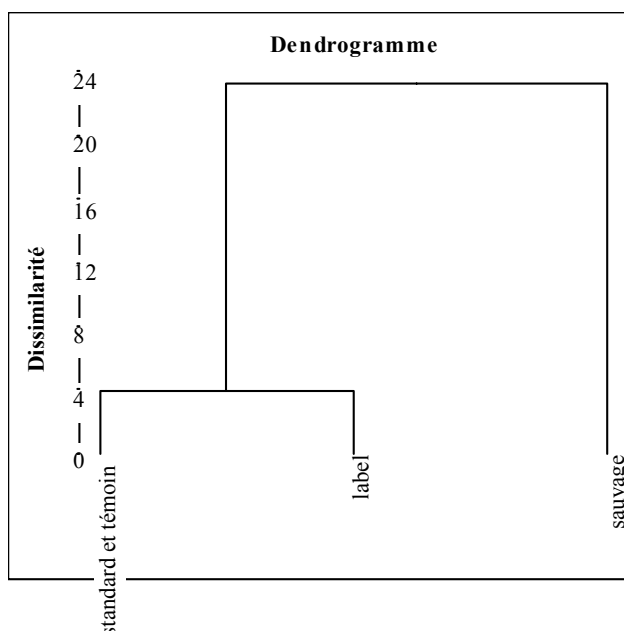


Figure 47 : Dendrogramme permettant de représenter le niveau de dissimilarité entre les lots standards, les lots candidats au Label et le lot sauvage.

Cette représentation confirme les résultats de corrélation trouvés plus haut : les poissons candidats au Label ont une corrélation de 99,7% avec les saumons standard, et 93,33% avec le saumon sauvage, alors que les saumons standard n'ont une corrélation avec le saumon sauvage que de 90,6%.

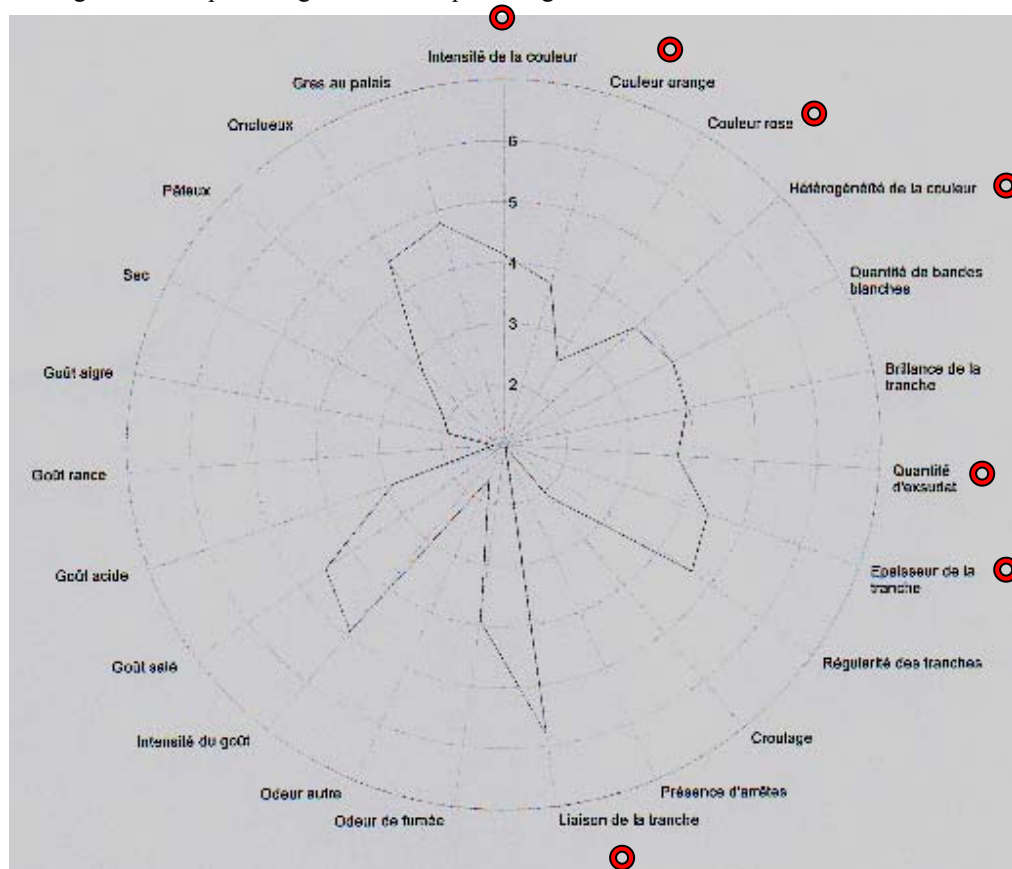
Au vu des résultats, la méthode d'élevage choisie permet en effet de modifier les profils en acides gras de la chair et de les rapprocher de ceux de saumons sauvages. Les teneurs des saumons de l'étude respectent les recommandations de l'AFSSA en acides gras de la famille oméga 3 et système cardiovasculaire : intérêt nutritionnel et allégations. Ces recommandations reposent sur 3 niveaux de preuves : **Les saumons fumés et frais sont donc riches en oméga 3. Les saumons fumés et frais participent au rééquilibrage des apports en acides gras oméga 3. Les omégas 3 participent au bon fonctionnement cardiovasculaire.**

En conformité avec les contrôles effectués sur les lots de saumons, des analyses radio biologiques (recherche des particules radioactives Césium 134 et Iode 131) et de métaux lourds (Cadmium, Etain, Mercure, Nickel, Plomb, Sélénium) ont été demandées. Elles étaient totalement conformes à la réglementation en vigueur. De même pour les contrôles microbiologiques (résultats non présentés).

❖ Qualité organoleptique

Les deux candidats au Label Rouge (fumé tranché frais, fumé tranché raidi) présentent une couleur moins intense, moins orange, plus rose, une quantité d'exsudat plus importante, une tranche plus épaisse que le produit fumé de comparaison commercialisé (standard, salé au sel sec). Les deux candidats au Label Rouge présentent une couleur moins hétérogène, et une tranche plus liée que le produit de comparaison commercialisé (haut de gamme, salé par injection). Les deux candidats au Label Rouge possèdent donc des caractéristiques sensorielles spécifiques d'aspect, et notamment au niveau de la couleur.

Figure 48 : Test consommateur et analyse sensorielle : étude n°031628-1. moyennes des candidats au Label Rouge sur descripteurs significatifs. ● points significatifs.



En ce qui concerne l'étude hédonique sur les 60 consommateurs, aucune différence significative n'a été constatée entre les différents produits. Les notes moyennes font néanmoins apparaître la hiérarchie suivante (du plus apprécié au moins apprécié) :

- les deux candidats au Label Rouge présentent beaucoup de notes entre 8 et 10 (55% pour l'essai 6 et 47% pour l'essai 1), l'essai 1 étant le produit classé premier sur les critères d'aspect, d'odeur et de goût.
- le produit de comparaison commercialisé haut de gamme salé par injection est le produit le moins apprécié par les consommateurs pour ce qui est des intentions de consommation.
- les deux produits de comparaison interne (lot témoin)
- le produit de comparaison commercialisé standard.

❖ Discussion et conclusion :

Le suivi des paramètres d'élevage (tels que la température, la qualité de l'eau, la consommation d'aliment, la mortalité, la densité, la biomasse résidant dans un bassin..) a donné des résultats similaires entre les deux groupes, ce qui a permis de valider la comparabilité des deux lots testés. Ces résultats correspondent à une bonne régie d'élevage, conforme aux bonnes pratiques, témoin de la qualité des soins apportés aux poissons et du respect de leur bien-être.

Les résultats de cette expérimentation montrent que de février à mai aucune différence significative n'est apparue entre les lots. L'une des raisons pour laquelle on ne note pas de différence est que quand les poissons ont un poids supérieur à 2,5 kg, il est difficile de modifier les caractéristiques lipidiques des poissons.

Les pigments et la couleur sont régis par les pigments de l'aliment. Cependant, le statut en pigments et la couleur sont aussi affectés par le taux de croissance au-delà de 2,5 kg.

Si le changement d'un aliment standard vers un aliment marin est réalisé au-delà de 2,5 kg de poids vif, et sur une période de moins de 3 mois, on ne note pas de différence significative. Cette différence peut être accentuée par la durée d'élevage pendant laquelle les saumons reçoivent l'aliment " marin ", par la saisonnalité (si l'aliment est donné dès le mois de décembre, les ratios seront plus fortement modifiés).

Les tendances d'évolution des profils en acide gras, les résultats organoleptiques bien que non significatifs encouragent la démarche visant à produire un saumon supérieur, et qui se rapproche des poissons sauvages connus pour leur haut ratio oméga 3/oméga 6 (notre témoin étant à 11). Une autre expérimentation doit être conduite afin de voir si ces tendances se confirment et deviennent significatives lorsque la durée de nourrissage avec l'aliment marin est augmentée et que les lots de comparaison sont homogènes au départ.

C. Expérimentation « Salmar »

Une seconde expérimentation a été menée avec la société Salmar (Norvège) afin de vérifier si une alimentation riche en produits de la mer avait plus d'influence sur les paramètres de croissance et la composition de la chair étaient plus sensibles sur quand les saumons étaient plus petits et de poids initial identique. De plus, lors de la première expérimentation, les poissons alimentés avec un aliment « marin » présentaient moins de lésions cutanées (tâches d'hiver, cannibalisme) que les autres groupes. Le but de cette expérimentation était donc d'étudier l'effet de l'aliment sur la sensibilité aux parasites, au stress et aux maladies

1. Matériel et méthodes

❖ Poissons

Les saumons étaient issus des écloséries suivantes :

- Neptune Settefisk AS, and Lobberfisk, 7801 Namsos (Souche Mowi, cage N°9)
- Neptune Settefisk AS, and Lobberfisk, 7829 Fosslandsosen (Souche ST stanfisk, cage N°11)
- Follasmolt AS, salmar Settefisk AS, Setransmolt AS, Follafooss (souche Aquagen Sunndalsora, cage N °14)

Les smolts ont été transférés en mer les 11 et 21 mai 2003 (souche Mowi), 21 avril 2003 (souche ST stanfisk), 27 juin 2003 (souche Aquagen). Les smolts avaient été mis à jeun pendant 2 jours avant transfert en mer. Les poissons de la Cage 14 en mer (lot essai, candidat au Label Rouge) sont des saumons, d'âge « 1+ », de souche aquagen, fournis par Aq Sunndel. Les Œufs ont éclos les 2 et 3 avril 2002, avec une température moyenne de 8°C (entre 7 et 8,2 °C). Puis le stade avec poche vitelline a eu lieu du 8 au 14 avril 2002, à 8,8°C de moyenne (entre 8 et 12°C). L'alimentation a débuté le 29 mai 2002 et s'est déroulée à 14°C de moyenne (entre 11 et 18°C). Dans le dernier bassin à la smolterie, la salinité était de 28‰ à 9°C, sous lumière naturelle, avec une teneur en O₂ de 80% minimum.

Lors des opérations de grading, les lots dont étaient originaires les poissons n'ont pas été mélangés. Des souches différentes ont en effet des capacités de croissance, de résistance aux maladies, de composition de la chair qui varient en fonction de leur origine génétique.

❖ Ferme en mer

Localité: Naustholmen, à proximité de la ville de Roan (Nord Trondelag, Norvège). La ferme a connu un vide sanitaire pendant une année. L'éleveur suit la norme norvégienne NS 9410 de maîtrise de l'environnement et de la qualité du site.

La force moyenne des courants était entre 1 et 5 cm/s (max 10 cm/s), avec un courant dominant de direction principale à 45°. La profondeur sous les bassins est entre 40 et 60 m. La température moyenne de l'eau oscille entre 4 et 18°C au cours d'une année. Le site est équipé de 5 cages de type Polar Circle avec une taille moyenne de 40 m de diamètre, 17 m de profondeur et un volume total de 5860 m³, soit une capacité de 146,5 tonnes. Le site a une capacité de production d'environ 1500 tonnes/an.

❖ Aliments distribués

Les exigences pour les saumons Label Rouge de cette ferme sont celles du cahier des charges Label Rouge : ingrédients marins à au moins 80%, astaxanthine < 80 mg/kg, rapport oméga 3/6 > 3,3, teneur maximale en lipides : 35%, PD/ED > 15 g/MJ, ED < 25 MJ/kg. L'aliment utilisé était le même que dans l'expérimentation précédente (Ocean Quality renommé Pyramid M MRM©, Ewos, Bergen, Norvège). Les saumons standard ont reçu de l'aliment Pyramid© (Ewos, Bergen, Norvège).

La qualité technique de l'aliment a été évaluée sur les critères suivants : quantité de poussières, flottabilité (un pellet doit encore flotter après 15 secondes), relargage de gras à la compression. La qualité chimique a été analysée : le taux de matières grasses et de protéines (la déviation acceptée entre la fiche technique du fabricant et le résultat d'analyse est de 1,5%), la teneur en pigments mais le test est peu précis : un seul test a une imprécision de 15%. Sur un mois, la déviation tolérée est de 5%. La digestibilité des protéines donnée par le fabricant, mesurée d'habitude par différence entre la teneur en un nutriment dans l'aliment et dans les fécès (Glencross Bret *et al* (2004)), n'a pas été vérifiée dans cette expérimentation (pour des raisons d'équipement technique).

L'aliment a été distribué de manière automatique. Le système automatique est constitué d'un axe flottant au centre de la cage par lequel arrive l'aliment. Un tube coudé permet la diffusion d'aliment. La force de propulsion de l'aliment entraîne la rotation de l'embout. Ainsi l'aliment est dispersé tout autour de la cage.

Les aliments ont été livrés toutes les semaines (10 à 12 tonnes par semaine en moyenne, et 23,9 tonnes par semaine au pic de production). 1 silo dessert entre 2 et 3 cages.

❖ **Planning d'abattage**

La cage N°14 est composée de 146 000 saumons issus de la smolterie Follasmolt© (Follafos, Norvège). En juillet, un grading* a été réalisé afin de séparer ce lot en deux cages, soit 14A et 14B :

<p>Cage 14</p> <p>737 Tonnes (poids vif) 660 Tonnes (poids fini)</p>	<p>Cage 14 A (12), de 100 m de périphérie, contenant 49 500 poissons env. Le poids moyen après grading était de 2,7 kg. 260 Tonnes (poids vif) : 220 T fini 191 Tonnes d'aliment distribuées jusqu'au début des abattages</p>	<p>Abattage : Octobre (Poids moyen estimé : 4,7 kg) fin d'abattage de la cage mi décembre</p>
	<p>Cage 14 B (16), de 120 m de périphérie, contenant 95 000 poissons env. Le poids moyen après grading était de 1,9 kg 477 T vif : 400 T fini 294 T d'aliment distribuées jusqu'au début des abattages</p>	<p>Abattage : mi-décembre (Poids moyen estimé : 5,2 kg) fin d'abattage de la cage mi février</p>

La cible des poids des saumons éviscérés est 4-5 kg. Le poids vif des saumons correspondant est de 5,3 à 5,4 kg. Les saumons ont été abattus sur l'abattoir de la société Salmar à Froya (Norvège) aussi dénommé ST423.

❖ **Analyses**

Début juillet, des contrôles de la qualité de la chair ont été réalisés avec l'appréciation de la couleur, de la teneur en gras et du profil d'acides gras. Les analyses de composition ont été réalisées par le laboratoire de recherche de Nutreco, (Stavanger, Norvège).

La fréquence des contrôles de la qualité de la chair ont été réalisés comme suit :

- au poids moyen de 1,5 kg,
- au poids de 2,5 à 3 kg,
- 1 mois avant abattage

Chaque jour, ont été enregistrés sur la ferme : la température de l'eau et de l'air ambiant, la quantité d'aliment chargée dans les cales, la quantité restante dans le bateau après distribution, par bassin, les résultats de la surveillance par caméra, le fonctionnement de l'éclairage (temps, nombre de spots en marche), la quantité d'aliment distribuée par cage, le taux de consommation et le nombre de poissons morts (poissons flottant et vidange d'un récipient au fond du filet où les poissons morts s'accumulent).

Par ailleurs, nous avons également contrôlé les échappées de poissons par le biais de la surveillance de l'étanchéité du filet et la recherche de trous (parois latérales et au fond), ainsi que par la recherche de poissons à l'extérieur. Le contrôle de la consommation d'aliment était permis par l'utilisation d'une caméra dans chaque bassin et par le suivi visuel des aliments gaspillés. Les calculs de taux de consommation et les estimations du VFI* ont été actualisés en fonction du nombre de poissons morts. La quantité de poissons morts a été incluse dans le calcul du taux de consommation (FCR) économique, le nombre de poissons livrés de la smolterie étant considéré comme la référence.

Les causes de mortalité ont été suivies par le vétérinaire de l'élevage: en particulier la CMS (Cardiac Muscle Sclérosis) et toutes les lésions pathognomoniques de maladies légalement

réputées contagieuses... En retour d'abattoir, lorsque les premiers lots issus de la ferme ont été abattus, les poissons trop petits ont été assimilés à des poissons morts avant abattage. Chaque mois, les poids ont été vérifiés en prélevant 30 poissons au moins. De plus, la longueur à la fourche (pour le calcul du facteur K), et la contamination par les poux de mer ont été mesurés.

Lors de l'élevage deux séries de prélèvements pour analyse ont eu lieu pour les saumons Label à 3 mois, (le 23 juin 2004), et à 6 mois (19 octobre 2004) de nourrissage avec un aliment marin, et un prélèvement sur poissons standard en octobre 2004. Ils ont été analysés au laboratoire ARC Nutreco. A la réception dans les locaux de MERALLIANCE© (Quimper, France), les lots ont été analysés sur le plan de leur conformité microbiologique. Puis, après transformation, des tests de dégustation ont été menés.

❖ Analyses Statistiques

La croissance a été comparée grâce au test de Student pour données appariées avec intervalle de confiance à 95 % de la moyenne des différences. Les paramètres de composition des 3 lots ont été analysés par le test de Friedman.

2. Résultats et discussion

❖ Performances d'élevage

croissance: En partant de poids initiaux identiques, la croissance des saumons « Label Rouge » a été plus lente par rapport que pour les poissons standard, nourris avec un aliment plus énergétique.

figure 49 : Comparaison des courbes de croissance des poissons nourris avec un aliment standard (« ordinary ») et des saumons candidats au Label Rouge. Les poissons standard sont issus de la cage 12 séparée après grading en cage 12 et 15. La « marche » visible sur les courbes correspond au changement du poids moyen des poissons suite à l'opération de grading. (Source : Eva Haugen, responsable qualité, société Salmar. 2005.)

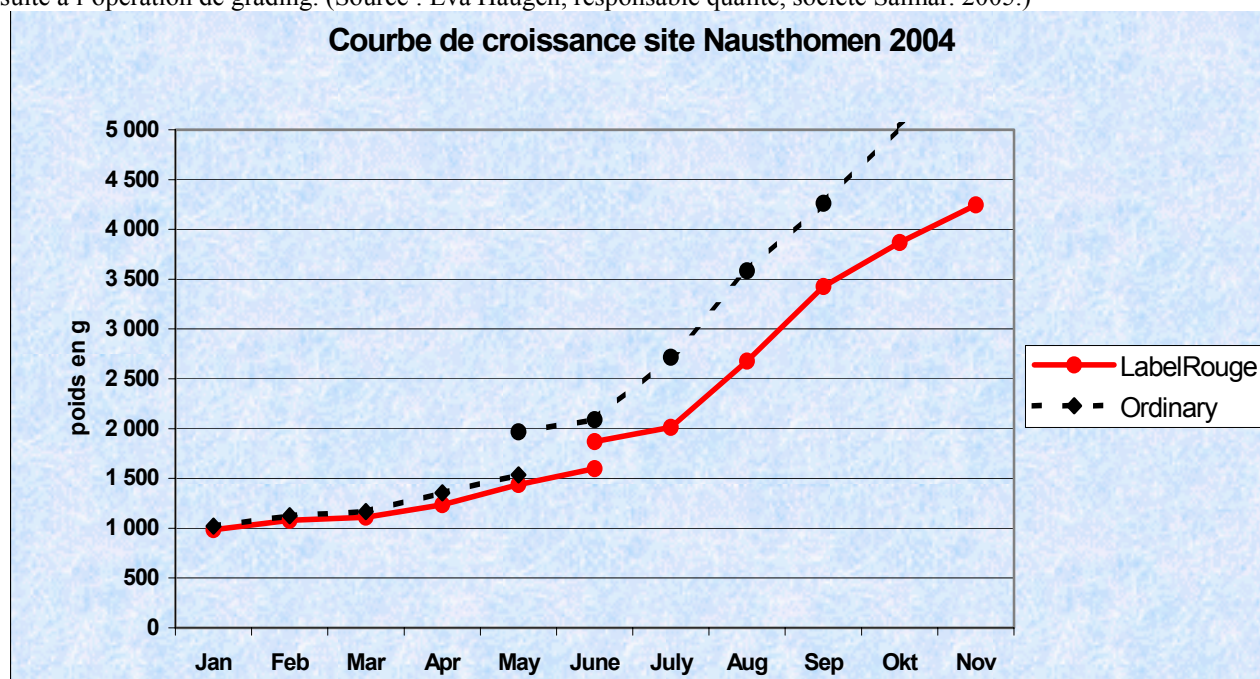


Tableau 27 : Analyse statistique des paramètres de croissance des lots standard et Label Rouge. La différence de croissance des deux lots est statistiquement significative ($p < 0.05$).

Echantillon	Fréquence	Moyenne	Variance	Ecart-type
standard	10	2387,9	2099219	1448,9
Label Rouge	10	1943,3	1075481,1	1037,1
Diff (standard - Label Rouge)	10	444,6	184496,5	429,5

t (valeur observée)	3,273	<p>Au seuil de signification $\text{Alpha} = 0,050$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes. Autrement dit, la différence entre les moyennes est significative.</p> <p>Lorsque le poids initial moyen des lots de saumons est identique, les deux aliments permettent des performances de croissance différentes : les saumons « Label Rouge » ont une croissance plus lente</p>
t (valeur critique)	2,262	
ddl	9	
p-value bilatérale	0,010	
Alpha	0,05	

Mortalité :

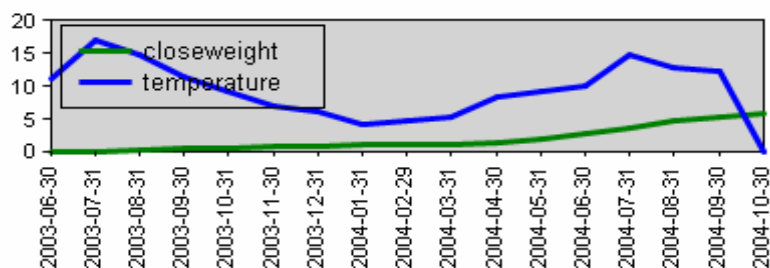
A la fin de l'expérimentation, des problèmes de sclérose du muscle cardiaque ont entraîné une augmentation de la mortalité dans le lot des saumons candidats au Label. L'augmentation de cette pathologie est sans doute liée à une plus longue période d'élevage en mer pour les derniers poissons abattus (22 mois). Des poissons matures commençaient également à apparaître.

Consommation de l'aliment des saumons candidats au Label : La croissance totale (différence biomasse entrée – biomasse sortie) a été de 270 240 kg, pour 226 834 kg d'aliment distribué. L'indice de consommation (rapport de la quantité d'aliment distribuée en MS au poids final des saumons en poids humide) était de 0,89. A la fin de l'abattage de ce lot, les saumons avaient passé près de 2 ans en mer. Le poids moyen était nettement moindre de celui des saumons standards.

Figure 50 : Extrait de la fiche de suivi de lot du lot Label Rouge. (Source Eva Haugen, Salmar, 2005). Les informations présentées rapportent l'évolution de la température, de la densité et de la croissance. Les différents aliments utilisés sont listés et quantifiés, de même que les traitements.

Temperature °C	
Min	5,6
Moy	9,35
Max	16,90

Densité M ³	
Min	,74
Moy	10,37
Max	19,58



aliment					
Type d'aliment	fournisseur	Début d'utilisation	Asta	Qté distribuée	% du Total
Transfer Boost 60A - 50	Ewos	2003-07-05	60	3 182	1,40%
Transfer 60A - 50	Ewos	2003-08-09	60	1 626	,72%
Transfer 60A - 150	Ewos	2003-08-23	60	14 127	6,23%
Transfer 60A - 600	Ewos	2003-10-27	60	9 982	4,40%
EWOS transfer 60A-600	Ewos	2004-03-01	60	1 764	,78%
Neptun 800 60 A 9,0	Skretting	2004-03-12	60	7 644	3,37%
EWOS pyramid M MRM 1000 50A	Ewos	2004-04-17	50	54 953	24,23%
EWOS pyramid M MRM 2500 30A	Ewos	2004-07-12	30	132 476	58,40%
EWOS pyramid 2500 30A-500	Ewos	2004-08-26	30	1 081	,48%
Total				226834,34	100 %

Aliment médicamenteux		
Type	Last Date Used	Amount
Slice vet	2003-08-29	239,05

Traitements		
Type	Date de fin	quantité
ALPHAMAX	2004-08-17	1350 ml
ALPHAMAX	2004-09-21	1350 ml

❖ Résultats à abattage :

Le facteur K avait une valeur de 1,25 chez les poissons Label Rouge, donc plus fins que les saumons standards. Ceci est probablement lié à une teneur plus faible en lipides dans l'aliment et à un niveau de rationnement inférieur. 96% des poissons étaient de qualité supérieure (habituellement 95% de supérieurs, 4% d'ordinaires et moins de 1% de « production »). Les principaux motifs de déclassement étaient liées à des déformations de la mâchoire et du menton, avec quelques poissons au corps difforme, quelques coupures et quelques poissons morts d'une « crise cardiaque » à la suite de la sclérose de leur muscle cardiaque. Ils avaient également, en fin de lot, un ventre rouge et une perte de mucus et d'écailles (témoin de stress).

Composition et profils en acides gras de la chair des poissons :

Tout comme dans la première expérimentation Grieg, l'effet de l'alimentation sur la chair des saumons a été mesuré. La teneur de la chair en matières grasses et en pigments (la coloration des saumons est le facteur le plus important aux yeux des consommateurs) sont représentés dans le tableau 28 et analysés dans le tableau 29.

Tableau 28 : Analyse sur échantillons du 19 octobre 04 et du 23 juin 04 et comparaison avec un lot standard. Mesures réalisées sur 5 poissons à chaque fois, par « Nutreco ARC laboratory », Stavanger, Norvège. (NQC= Norwegian Quality Cut) (Norwegian Standards Association, Oslo, Norway).

	moyenne lots Label		Moyenne lots standard
	23 06 04	19 10 04	19 10 04
Poids des poissons (en kg)	2,0	5,7	5,475
Astaxanthine (en mg) dans NQC	5,8	7,5	5,6
Astaxanthine (échelle Roche SalmoFan) dans NQC	24,9	28,0	25,8
MG (en % MS) in NQC	11,5	19,2	16,3
Omega-3 (% des MG)	21,5	22,5	21,2
Omega-6 (% des MG)	3,3	4,4	7
EPA (% des MG)	5,9	6,4	5,1
DHA (% des MG)	9,9	9,5	9,2

Les 3 groupes ont été comparés selon la méthode de Friedman. Le Q de Friedman est distribué comme un χ^2 . Au seuil de signification $\alpha=0,050$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 3 échantillons. Autrement dit, la différence entre les échantillons est significative.

Tableau 29 : Analyse statistique des résultats de composition selon le test de Friedman.

Q (valeur observée)	6,750
Q (valeur critique)	5,991
ddl	2
p-value unilatérale	0,034
Alpha	0,05

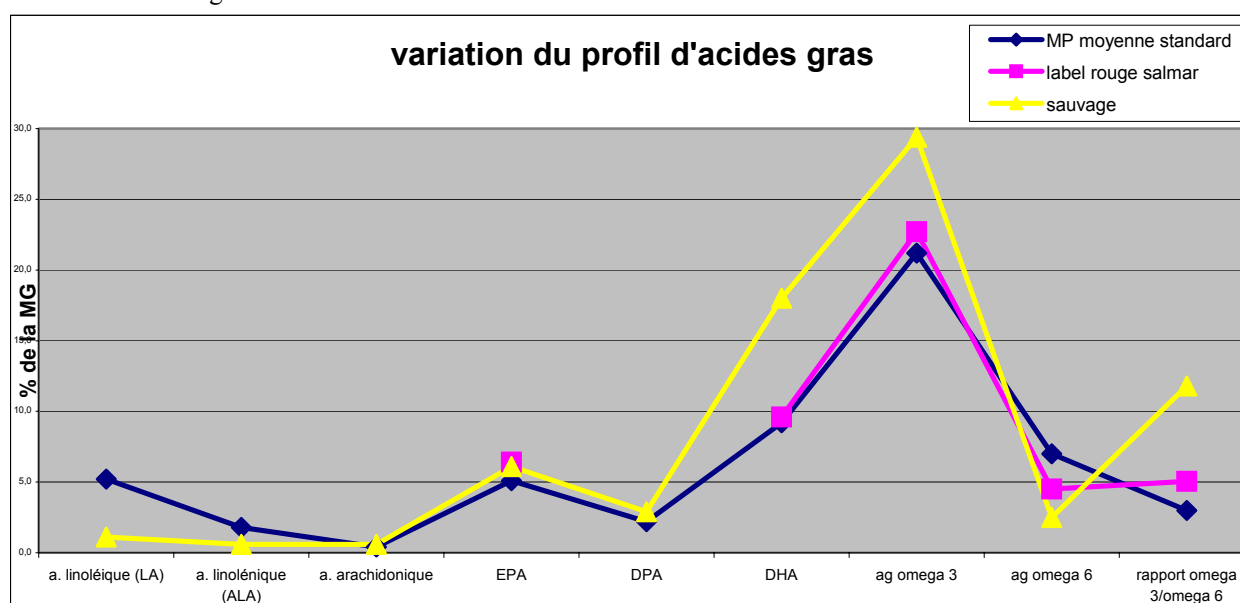
Matrice des comparaisons par paires (conclusion) :

	19 10 04	23 06 04	standard
19 10 05		x	x
23 06 04	x		NS
standard	x	NS	

Remarque : NS = différence non significative, x = différence significative.

Le lot analysé au bout des six mois de nourrissage (19 octobre 04) avec un aliment marin est statistiquement différent des deux autres lots. Tout comme dans l'expérience Grieg, trois mois de nourrissage sont insuffisants pour aboutir à une différence significative avec un lot standard.

figure 51 : Comparaison du profil en acides gras de la chair de saumons Label rouge Salmar avec un lot standard et un saumon sauvage Coho.



❖ Analyse bactériologique et qualitative à réception dans l'usine de fumage

tableau 30 : Résultats des poissons reçus de la société Salmar entre octobre et novembre 2004. (Source : Meralliance, lab. Interne). Les numéros de lots correspondent à des jours d'abattage/ d'arrivage/ des calibres de poissons différents. La lettre Q ou N correspond au site sur lequel ont été transformés les poissons (Quimper ou Narvik).

N° de Lot	Coliformes Fécaux (ufc)	Flore Totale (ufc)	Listéria (Recherche)	Humidité (%)	Matière Grasse (%)
7458Q	NA	NA	NA	63,66	16,34
7460Q	NA	NA	NA	66,17	13,83
1840N	<1	106	Absence	69,59	10,41
7459Q	<1	125	Absence	62,33	17,46
7459Q	NA	NA	NA	64,94	13,19
7459Q	NA	NA	NA	65,32	12,85
7520Q	NA	NA	NA	66,06	13,94
7521Q	<1	72	Absence	66,81	11,75
7522Q	NA	NA	NA	66,66	13,34
1858N	<1	30	Absence	67,75	10,18
7523Q	NA	NA	NA	68,08	11,92
7524Q	<1	46	Absence	66,97	12,87
7525Q	NA	NA	NA	66,98	13,02

Tous les résultats des analyses des lot de saumons Label Rouge et standard en provenance du site ST423 sont conformes en terme microbiologique

❖ Analyse organoleptique

Des analyses organoleptiques ont été menées afin de noter la qualité organoleptique de saumons Label Rouge fumés. Les valeurs des paramètres descriptifs ont permis de dresser un profil sensoriel (présenté dans la figure 52)

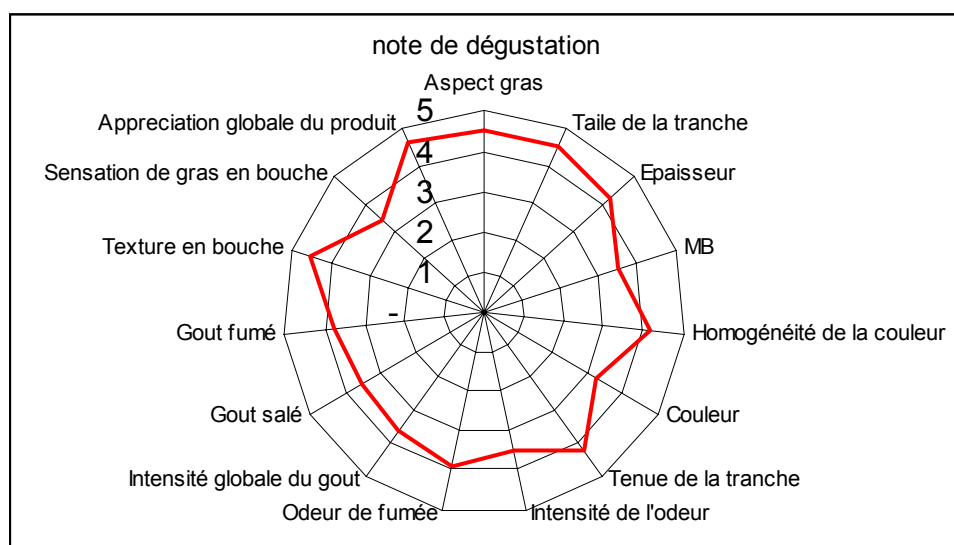
Tableau 31 : Résultats des tests organoleptiques réalisés en interne sur un lot Label Rouge Océan Qualité, en novembre 2004, avec 10 juges d'un jury entraîné. L'échelle de notation va de 1 (intensité faible) à 7 (intensité élevée).

Un seul produit présenté : saumon fumé présenté en conditionnements de 4 tranches fabriqué la veille de la dégustation

Paramètre descriptif	Echelle : descriptif		Moyenne	Impression globale
	1	7		
Aspect gras	peu gras	huileux suintant	5	plutôt gras
Taille de la tranche	très petite	très grande	5	plutôt grande
Epaisseur	très fine	très épaisse	4	plutôt épaisse
Muscle brun (MB)	pas de MB	Beaucoup de MB	3	1 cm de MB
Homogénéité de la couleur	Hétérogène	Homogène	4	plutôt homogène
Couleur	Rose	Rouge	3	orange
Tenue de la tranche	Peu de tenue	Forte tenue	4	tenue moyenne
Intensité de l'odeur	Pas d'odeur	Odeur anormale	4	odeur peu intense
Odeur de fumée	Peu intense	Très intense	4	odeur de fumé moy. intense
Intensité globale du goût	Pas de goût	Goût anormal	4	intensité du goût moy intense
Goût salé	Peu intense	Très intense	4	modérément salé
Goût fumé	Peu intense	Très intense	4	modérément fumé

	Echelle : descriptif			
Paramètre descriptif	1	7	Moyenne	Impression globale
Texture en bouche	Ferme	Fondante	5	texture fondante
Sensation de gras en bouche	Peu intense	Très intense	3	sensation de gras peu intense
Appréciation globale du produit	J'aime pas	J'aime beaucoup	5	apprécié

Figure 52 : Profil sensoriel de la dégustation des saumons fumés Label Rouge Océan Qualité. Certains paramètres sont dépendants du procédé de fabrication (fumé, salé, taille de la tranche, épaisseur...), d'autres sont liés à la qualité de la matière première (couleur, tenue de la tranche, aspect gras...).



Les notes de dégustation étaient globalement satisfaisantes. Les notes les plus basses ont été obtenues pour la couleur et la sensation de gras en bouche. La sensation de gras en bouche a été réduite, ce qui était prévisible puisque la teneur de la chair en matières grasses était inférieure. La chair semble plus ferme et granuleuse. Le profil organoleptique se rapproche des résultats obtenus chez des saumons sauvages.

❖ Discussion.

La croissance des saumons Label Rouge a été inférieure aux saumons standards avec un poids final moyen de 3,8 kg contre plus de 5 kg pour les saumons standards en octobre 2004. Cette différence de croissance peut être expliquée par la différence de la teneur en gras et en énergie digestible de l'aliment. Le facteur K était plus élevé chez les saumons Label Rouge, témoignant d'un rapport longueur / poids du corps plus élevé. Pour des saumons de même taille, les saumons Label Rouge sont moins gras. Le rendement à abattage est donc meilleur.

Le profil en acides gras des saumons nourris pendant 6 mois avec un aliment marin est significativement différent de celui de poissons standards (tableau 30, $p < 0,05$), alors qu'à 3 mois, la différence n'est pas significative. Le profil en acides gras de la chair de poissons Label Rouge est, tout comme dans l'expérimentation décrite au paragraphe V B, intermédiaire entre des saumons standard et des saumons sauvages. (cf. figure 51).

Après 4,5 mois de vie en mer (en août 2004), une différence de mortalité a été constatée entre les lots de saumons standard et les saumons Label. Bien que provenant des mêmes écloséries, et vivant sur un même site, les poissons standards avaient un taux de mortalité supérieur à 17%. Cette mortalité était liée à un passage de Nécrose Pancréatique Infectieuse (IPN). Cette

maladie entraîne habituellement de forts taux de mortalité (de 40 à 60%). En 2004, l'IPN affectait toujours des saumons en Norvège bien que la mortalité qu'elle occasionnait était plus faible. La mortalité des saumons Labels n'était que de 3% dans la même période.

Tous les poissons ont donc à priori été contaminés, mais ils ont réagi différemment. Cette observation montre que les aliments d'origine marine pourraient avoir un effet bénéfique sur la résistance des poissons aux maladies. Ceci est d'autant plus intéressant que pour l'instant les sélectionneurs ne possèdent pas de souches de poissons résistantes à l'IPN.

L'objectif de ce nouveau référentiel Label Rouge était d'aboutir à un saumon de qualité supérieure tant sur le plan organoleptique que nutritionnelle, avec comme « idéal » le saumon sauvage. Les deux expérimentations ont permis de confirmer à échelle industrielle les observations précédentes de scientifiques qui avaient montré que 3 mois ne suffisaient pas à restaurer des profils en acides gras et que 6 mois étaient nécessaires pour avoir des différences significatives avec des saumons « standard ».

Le saumon candidat au Label Rouge tend à se rapprocher du saumon sauvage en terme de composition en acides gras et présente un profil en acides gras intermédiaire entre le saumon sauvage et le saumon standard (statistiquement significatif pour le LA, les oméga 3 et oméga 6). Le saumon candidat au Label et le saumon sauvage sont différents du saumon standard pour l'EPA et le DPA. Bien que modestes, les résultats vont dans la voie d'un saumon meilleur d'un point de vue nutritionnel.

D'un point de vue organoleptique, les résultats ne sont pas statistiquement significatifs. Toutefois ce produit a eu le meilleur classement en dégustation aveugle, ce qui était inespéré. En effet, lors de la préparation du projet, nous avons consulté d'anciennes études organoleptiques entre saumons fumés d'élevage de différentes qualités et saumons fumés sauvages. Dans toutes les études en aveugle, le saumon sauvage ressortait dernier dans le classement des consommateurs, beaucoup lui reprochant son côté sec et rugueux en bouche. Les consommateurs semblent en effet ne pas être habitués aux caractéristiques des saumons sauvages. Lorsque les études sont réalisées avec dévoilement de l'origine du saumon, le saumon sauvage remonte dans le classement mais n'est, cependant, pas le plus apprécié.

Deux autres points ont été soulevés par ce référentiel : le développement durable et le bien-être des saumons. Sur ce dernier point, au cours des deux expérimentations, nous avons observé que les saumons nourris avec l'aliment marin avaient moins de lésions cutanées (« Winter sore » et/ou cannibalisme), et que le taux de mortalité était inférieur. Ces pistes méritent d'être approfondies, en particulier sur l'augmentation de la sensibilité des saumons aux maladies à cause des substitutions végétales dans l'alimentation des saumons.

Cette étude a suscité de nombreuses oppositions, beaucoup d'intervenants considérant que nourrir les saumons avec des aliments contenant autant de matières premières d'origine marine, s'opposait fondamentalement au respect de la ressource halieutique. Le développement durable a été intégré directement dans le référentiel avec des impératifs de protection de la **pollution environnementale** par contrôle des entrants, des rejets des sites.

Avec des impératifs de protection sociale des travailleurs par la prévention de l'apparition des troubles musculo-squelettiques.

Et enfin avec la prise en compte simultanée des préoccupations économiques, environnementales et sociales au travers de travaux pour la mise en place d'une certification pêcherie minotière durable de type Marine Stewardship Council (MSC). Une pêcherie est en

cours de certification Marine Stewardship Council (MSC) : le Hareng de la mer du Nord. Le stock est important (80 000 tonnes). L'usage prévu pour le moment est exclusivement humain. Nous pouvons cependant ajouter à ce référentiel pour un usage minotier. Cependant, le Hareng est un poisson qui ne peut convenir à lui seul pour la fabrication des aliments pour saumons. Son goût est trop marqué et diminue l'appétence des aliments qui en sont issus. Une autre pêcherie est d'ores et déjà certifiée pour cet usage : le Hoki de Nouvelle Zélande. Le MSC est un organisme né de World Wild Foundation (WWF), qui a pour objet de promouvoir la mise en place de certifications de pêche durable.

Une autre piste est à approfondir, celle de la mise en place de systèmes de polyculture. Ces systèmes sont d'anciens modes de culture originaires de Chine. Ils consistent à associer plusieurs types d'élevage. Chaque élevage valorise les déchets, les résidus issus de l'élevage en amont. Ce système a pour but d'assurer une production et un traitement des déchets. En élevage de saumons en mer, un système de polyculture comporte des mollusques filtreurs, des microalgues et des algues.

Conclusion

Les saumons sauvages sont des poissons carnivores qui se nourrissent d'autres poissons, de krill* (nom d'origine norvégienne qui signifie «nourriture des baleines» et donné à ces milliards d'animaux planctoniques vivant habituellement en banc). Les saumons d'aquaculture sont nourris avec des aliments composés de farines et des huiles de poissons issus de la pêche minotière.

Les scientifiques s'accordent pour dire que les ressources halieutiques sont menacées : l'essor de l'aquaculture génère une demande toujours plus forte sur les produits de la pêche minotière or, on sait que d'ici 2010, la demande en huiles de poisson dépassera largement l'offre ! Dans le même temps, beaucoup de poissons subissent une pression de pêche minotière et hauturière mettant en péril le renouvellement de leur population, d'où une **diminution inquiétantes des ressources marines**.

Pour éviter disparition des stocks de poissons fourrage, permettre leur reconstitution et pour une aquaculture «durable», les différents acteurs de la filière se sont mis d'accord pour substituer une partie des matières premières marines par des végétaux, et ainsi **rendre les saumons et les truites, ...partiellement végétariens**.

Les constats de cette thèse ne font que confirmer certaines études scientifiques et montrent que la **qualité de la chair** des poissons nourris à base d'aliments substitués avec des végétaux diffère de celle des poissons nourris exclusivement à base de composés marins. En effet, chez les saumons nourris avec des matières premières marines, la chair est plus riche en acides gras oméga 3, en EPA et en DHA, et le rapport $\omega 3/\omega 6$ est plus élevé. La composition des saumons nourris avec un aliment marin apparaît plus bénéfique à la **santé humaine**.

Sur le **plan organoleptique**, on constate chez les poissons nourris avec un aliment marin, le goût et l'odeur sont celles du poisson (vs odeur moins marquée, plus douce pour les saumons nourris avec un aliment contenant des matières premières végétales). La texture est également modifiée et à l'instar des saumons sauvages, la texture est plus ferme et plus rugueuse que celle des poissons nourris par des aliments substitués avec des végétaux.

D'autres paramètres qualitatifs sont soumis à des influences autres qu'alimentaires :

- tels des facteurs génétiques : la teneur en matières grasses est très variable entre individus au sein d'un même lot,
- tels des facteurs environnementaux et nutritionnels : comme détaillé plus avant, la pigmentation varie en fonction de la teneur en matières grasses et en pigments de l'aliment, mais également en fonction de la teneur en matières grasses du poisson. Si le poisson a été stressé, une partie des pigments est perdue au moment de la saignée.

Ainsi, **les conditions d'élevage et d'abattage** participent à la qualité finale du produit. Au cours de la vie en eau douce, la sélection des œufs, la maîtrise de la température et de l'éclairage, l'hygiène et le régime alimentaire conditionnent la qualité future des saumons.

Deux principes doivent être pris en compte pour la **nutrition protéique** : les besoins en protéines totales et en acides aminés essentiels doivent être couverts, tout en respectant un équilibre entre les acides aminés. Le second point est l'utilisation optimale des protéines en tirant parti au maximum de l'effet d'épargne. En ce qui concerne la **nutrition lipidique**, le profil en acides gras des matières premières conditionne directement celui de la chair des

saumons. Un soin tout particulier doit être apporté lors de l'élaboration des aliments distribués à des périodes critiques (période de smoltification, 6 derniers mois de vie marine). Les AGPI étant particulièrement sensibles à l'oxydation, des agents antioxydants sont ajoutés afin de prévenir leur dégradation dans les aliments et dans la chair des saumons lors du stockage post mortem. Les **glucides** sont des nutriments difficiles à utiliser chez le poisson : au-delà de certains seuils d'incorporation, ils provoquent des réactions d'intolérance. Ils sont cependant intéressants car ils permettent une épargne des protéines.

Certaines **matières premières** sont déjà utilisables dans la composition de l'aliment marin, tels les déchets de crustacés (crevettes) qui sont d'ores et déjà utilisés : ils améliorent l'appétence et apportent de l'astaxanthine naturelle. Par ailleurs, leur réutilisation dans l'aliment aquacole permet ainsi la valorisation de ces coproduits. Pour les autres matières premières, afin de palier à la saisonnalité et aux aléas de la pêche, il est intéressant de réaliser des mélanges de différentes espèces de poissons (intérêt nutritionnel et organoleptique) dans des proportions fixées. Ces ajustements sont permis et possibles car la farine de poisson se conserve au moins 6 mois. Enfin, on peut accroître le pourcentage de matières premières d'origine marine en utilisant des algues : elles sont un agent liant et quelques espèces apportent des acides gras essentiels. A ce jour, leur incorporation est limitée en raison de leur teneur élevée en eau et en glucides. Toutefois, ces algues présentent l'avantage de ne pas être affectées par la surpêche et sont par nature une matière première durable.

Enfin, la **préservation de l'environnement** passe par la maîtrise des déchets issus des élevages. La maîtrise des pertes d'aliment est essentielle et passe par le choix de techniques de distribution ajustées à la consommation des saumons (prévision de la consommation en fonction de la température de l'eau et du courant, distribution avec contrôle visuel de la prise alimentaire). La maîtrise des pollutions des sites est réalisée par la mesure régulière des dépôts de déjections et de restes d'aliment sous les bassins, et la réalisation de vides sanitaires dont la durée est ajustée en fonction de la récupération du site (diminution du dépôt, récupération du biotope d'origine). Enfin, les mesures alternatives visant à limiter les intrants sont d'ores et déjà privilégiées dans le cahier des charges Label Rouge Océan Qualité (utilisation de poissons épouilleurs plutôt que d'antiparasitaires, nettoyage régulier des filets plutôt que d'utiliser des peintures antifouling fortement chargées en cuivre)

De plus, à ce jour, nous ne sommes pas en mesure de produire des acides gras polyinsaturés de la série oméga 3, nous ne faisons qu'exploiter des ressources disponibles. La pérennité des productions aquacoles passe donc par le non-gaspillage et la possibilité de renouveler cette ressource, pourquoi pas via la production de végétaux et d'algues productrices d'oméga 3.

Les articles de Chopin (1999), Bastarache (2003) et Landon (2003) permettent d'envisager le retour à **des systèmes de production de polyculture**. L'aquaculture intégrée, où des espèces extractrices et nourries sont élevées en même temps, semble être le moyen de recycler les nutriments et les particules inutilisées par les poissons d'élevage, et représente une opportunité de diversification des produits et de gain économique. Par exemple, les *Porphyra* sont des organismes qui ne grandissent que s'ils ont de bons apports de nutriments. L'été, ils sont affectés par la pauvreté des eaux. Si l'on réalise leur culture à proximité des piscicultures de saumons, les *Porphyra* réutiliseront les pertes de cet élevage et rentreront en compétition avec les algues redoutées pour leurs conséquences néfastes (Chopin (1999)).

Les rejets en azote et en phosphore perturbent sévèrement le milieu et favorisent le développement des maladies et de l'eutrophisation du milieu et provoquent des pics de production d'algues. On estime que 72% de l'N et 70% du P ingérés ne sont pas retenus par

les poissons. Le **développement de 340 m²d'oncospores**, telles que Gracilaria, qui ont été au préalable ensemencées sur les filets, permet d'assimiler l'azote relargué par un m² d'aquaculture de saumon (400m² pour le phosphore). La production de «mauvaises herbes marines» représente un vrai bénéfice pour l'écosystème côtier **en diminuant la charge de nutriments dans l'eau et la production de macro-algues et en synthétisant des produits commercialisables**.

P.yezoensis et *P.purpurea* répondent à des charges élevées de nutriments. Ainsi, ces végétaux participent à la diminution de l'eutrophisation du milieu. Leur croissance est rapide, impose une concurrence forte aux algues, et permet une récupération des cultures sur les filets tous les 9 à 15 jours. Avec les performances actuelles de l'aliment, 27 à 22 ramassages sur filets par an permettent de presque tout enlever en terme d'N et de P. *Porphyra linearis* et *Porphyra leucostica* ont une très haute qualité gustative. *Porphyra amplissima* et *Porphyra purpurea* sont intéressantes pour l'industrie et les biotechnologies (extraction de taurine et de r-phytoerythrine).



Les performances de croissance des **moules (Mytilus edulis)** a été étudiée, au contact direct des cages de saumons, à 500 m et à 1250 m, sur une période de 12 mois. Les moules sur le site de l'élevage ont grandi deux fois plus vite en poids que les moules à 500 et 1250m. Ceci était en corrélation directe avec l'augmentation de la charge organique sur les sites.

Les algues ont aussi un rôle à jouer dans des systèmes de polyculture : aucun thérapeutique chimique utilisé dans le traitement des maladies des saumons élevés dans les filets environnants n'a été retrouvé dans le varech. L'augmentation de la production de varech à proximité des cages de saumons, et l'absence de transfert de thérapeutiques valident le concept d'une aquaculture intégrée.

L'adoption de pratiques polytrophiques (oncospores, organismes unicellulaires, moules, algues...) sera la clef de l'industrie aquacole afin de développer des systèmes équilibrés sur les plans environnemental et économique, tout en augmentant leur acceptabilité sociale. Dans ces systèmes, les espèces seront choisies en fonction de leur complémentarité, de leur capacité d'absorption et de production. Ainsi, certaines espèces de micro algues capables de produire des AGPI de la série oméga 3 pourront être directement intégrées comme épurateur de milieu et (ré)générateur de nutriments essentiels.

Annexe 1 : Quelques définitions et abréviations

Les principales définitions et abréviations utilisées dans le texte sont détaillées ci-dessous :

Absorption	Passage de molécules alimentaires ou non alimentaires de la lumière intestinale vers le milieu intérieur
Acides gras essentiels (AGE)	<p>Acides gras polyinsaturés que l'organisme ne peut synthétiser. Acides gras à 18 atomes de carbone ou plus avec au moins deux doubles liaisons.</p> <p>Ils ont un rôle :</p> <ul style="list-style-type: none"> - énergétique - structural (membranes cellulaires, enzymes cyclooxygénase et lipooxygénase) - précurseur d'éicosanoïdes, de prostagandines et leucotriènes - régulateur de l'expression des gènes - dans le fonctionnement de la vision, du système cardiovasculaire, du système nerveux central et immunitaire et dans le développement du fœtus
Acides gras indispensables	Les deux chefs de file des AGE ω 3 ou 6 sont indispensables pour la croissance normale et les fonctions physiologiques de tous les tissus.
AGE ω 3 ou n-3	<p>La dernière double liaison est à 3 atomes du carbone terminal de la chaîne (appelé carbone n). le chef de file est l'acide alpha linoléique (C18 :3n-3)</p> <p>H₃C  COOH</p>
AGE ω 6 ou n-6	<p>La dernière double liaison est à 6 atomes du carbone terminal de la chaîne (appelé carbone n). le chef de file est l'acide linoléique (C18 :2n-6)</p> <p>H₃C  COOH</p> <p>Dans les deux familles, seuls les chefs de file sont vraiment essentiels. Ils peuvent être convertis par désaturation de la chaîne par les enzymes de l'organisme en différents acides gras ω3 ou 6.</p>
Acides gras polyinsaturés	<p>Constituants des lipides comportant au moins deux doubles liaisons. On les distingue des acides gras saturés et des acides gras monoinsaturés selon le nombre de simples ou doubles liaisons qu'ils présentent.</p> <p>Parmi ces acides, on distingue les oméga 3 et les oméga 6 selon la position des doubles liaisons.</p>

AGPI	<p>Acides gras polyinsaturés appelés aussi en anglais « poly unsaturated fatty acids" ou PUFA</p> <p>Les principaux AGPI de la série n-3 sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'EPA* ou C20:5n-3 - le DHA* ou C22:6n-3 - l'acide β stéaridonique C18:4n-3 <p>les principaux AGPI de la série n-6 sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'acide gamma-linolénique (ou GLA) C18:3n-6 - l'acide dihomogamma-linolénique (DGLA) C20:3n-6 - l'acide arachidonique (AA) C20:4n-6
Anadromes	Qualifie les espèces qui se reproduisent en eau douce mais passent la majeure partie de leur vie en eau salée (comme le saumon Atlantique).
Appétence	Appétit que l'animal manifeste pour un aliment
Aquaculture	<p>La FAO définit comme suit (d'après NASCO/ISFA liaison group, (2003)): L'aquaculture est l'élevage d'organismes aquatiques incluant les poissons, les mollusques, les crustacés et les plantes aquatiques. La culture implique plusieurs sortes d'intervention dans le processus d'élevage afin d'améliorer la production, tels que le confinement régulier, l'alimentation, la protection des attaques de prédateurs, etc. La culture implique aussi la propriété individuelle ou en groupe de la ressource cultivée. A des fins statistiques, les organismes aquatiques qui sont abattus par une entité individuelle ou coopérative qui les a détenus tout du long de leur période d'élevage est également compris dans l'aquaculture, alors que les organismes qui sont exploitables par le public en tant que ressources de propriété publique, avec ou sans licence appropriée, relèvent de l'exploitation de pêcheries.</p> <p>Les définitions de la NASCO, reprises dans la résolution d'Oslo de 1994, article 6 développent les définitions propres aux activités associées aux salmonidés.</p> <p>“Dans le cadre de cette résolution:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <u>l'aquaculture</u> des saumons est la culture ou la reproduction de saumon Atlantique qui inclut l'élevage des saumons, les saumons relâchés et de repeuplement. 2. <u>L'élevage du saumon</u> est un système de production qui implique le grossissement de saumon Atlantique en captivité durant un cycle de vie jusqu'à abattage. 3. Le <u>lâcher de saumons</u> est la libération de saumons juvéniles d'élevage avec l'intention de les abattre tous ensuite. 4. Le <u>repeuplement</u> représente l'augmentation des stocks sauvages de rivières par le lâcher de saumons Atlantique à différentes étapes de leur cycle de vie, afin d'augmenter la quantité d'individus peuplant un biotope à une période donnée. 5. Les <u>saumons sauvages</u> sont des saumons qui sont nés naturellement et qui n'ont pas été soumis à aquaculture. 6. Le <u>transfert</u> est le transport délibéré ou accidentel de saumons Atlantique au sein de leur milieu d'origine ou « naturel. »

DV	Durée de Vie, période pendant laquelle le produit reste dans les limites des critères physicochimiques, microbiologiques et organoleptiques. Elle correspond à la DLC plus 48 h par principe de précaution.
Echelle de Roche, Echelle de Salmofan	échelles de couleur dans les tons orangés utilisées par les professionnelles pour l'évaluation de la couleur des filets ou des darnes pour le saumon frais et des filets ou tranches pour le saumon fumé.
EPA	acide eicosapentaénoïque, principal acide gras de la famille oméga 3 avec le DHA.
Euryphagique carnivore	Qui supporte de grandes variations dans les espèces, sources de protéines, qui constituent son régime alimentaire
Fatmeter	Appareil de mesure du taux de gras sur les filets
FE	Efficacité alimentaire Gain de masse corporelle ----- aliment ingéré l'efficacité alimentaire d'un lot n'est pas égale à la moyenne de l'efficacité alimentaire des individus du lot
Fooling	Dépôt naturel d'algues sur des structures immergées en eau de mer
Gaping	Décollement des feuillettes de fibres musculaires
Grading	Opération de tri des poissons consistant à séparer les poissons les plus petits (ou à vitesse de croissance lente) des poissons les plus gros (ou à vitesse de croissance plus élevée). Les poissons sont aspirés, puis dirigés vers l'un ou l'autre des bassins en fonction de leur poids (système de balance) ou de leur volume (système de balance).
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point, analyse des risques en vue de la maîtrise des points critiques.
HSI	Index hépatosomatique Masse du foie/ poids total du corps
IC (ou CI en anglais)	Indice de consommation ou Efficacité d'utilisation de l'aliment aliment ingéré ----- = indice de consommation gain de masse corporelle
IHN	Nécrose Infectieuse Hépatique
Index viscérosomatique	Masse des viscères/masse totale du poisson
IPN	Nécrose Infectieuse Pancréatique
Jeûne	période pendant laquelle les poissons ne reçoivent plus aucun aliment

Krill	Le krill de l'antarctique est un crustacé zooplanctonique, aussi connu sous le nom scientifique latin <i>Euphausia superba</i> , il est considéré comme l'espèce animale la plus abondante de la planète. Des estimations de l'abondance du krill dans l'océan austral effectuées dans les années 80 et 90 suggèrent l'existence d'une ressource renouvelable de l'ordre de 150 millions de tonnes. (100 millions de tonnes de poissons de toutes sortes sont pêchées annuellement).
Lipides étalés	Forme de stockage temporaire qui ne se trouve que dans les entérocytes de poissons. Ils apparaissent après le repas, suite à l'estérification d'acides gras absorbés. Ils sont appelés ainsi grâce à leur aspect histologique. Ils peuvent être ensuite convertis en lipides particuliers (taille des globules inférieure aux chylomicrons), avant d'être transportés vers le foie.
Lipides neutres	Classe de molécules biologiques hydrophobes incluant : <ul style="list-style-type: none"> - les cérides (un acide gras estérifié avec un alcool long). C'est une forme de réserve. - Les glycérides neutres composés d'un ester de glycérol et d'un acide gras sans fonction ionisable. Ils constituent une réserve d'énergie ou des seconds messagers. - Les stérides (acides gras estérifiant des stérols)
MG	Matières grasses
Myomères ou myotomes	Ensemble de fibres musculaires collées entre elles et constituant le muscle blanc du filet
Myoseptes	Bande de collagène séparant deux myomères
NQC	Norwegian Quality Cut
Nutrition	La nutrition comprend plusieurs étapes : comportement et prise alimentaire, digestion et absorption, métabolisme des nutriments, excrétion et élimination des déchets.
PD/ED	Rapport protéines digestibles sur énergie digestible
Pêche	Sortie définitive du poisson de l'eau en vue de son abattage. Lorsque l'abattage est effectué immédiatement, la date de pêche et la date d'abattage sont donc identiques.
PLV	Publicité sur le lieu de vente
PM	Point de Maîtrise
Prise alimentaire	Ingestion ou consommation
Rationnement	Quantité distribuée par unité de masse corporelle
Rigor mortis	Rigidité cadavérique : phase cadavérique durant laquelle le corps se raidit
Smolt	Saumon élevé en eau douce prêt physiologiquement à passer en eau de mer. La smoltification du saumon est visible par sa robe argentée et mesurable par des analyses (exemple dosage de chlorures). Selon la durée passée en eau douce, on distingue les S0 (les premiers prêts à passer en eau de mer), les S1 et les S2. Les S2 restent jusqu'à 2 ans en eau douce avant d'être prêts à passer en mer, leur croissance en mer est ensuite très rapide.

Smoltification	Préparation physiologique du tacon à sa future vie maritime
Stade œuf oeillé	Stade de l'embryogenèse durant lequel l'œuf laisse apparaître deux gros yeux diamétralement opposés
TCS (ou SGR)	Taux de croissance spécifique
TCS (ou SGR)	$SGR = 100 (\ln \text{ poids final} - \ln \text{ poids initial}) / \text{ temps.}$
TGC	Coefficient de croissance thermique (ou thermal growth coefficient) $TGC = 1000 (\text{ poids final}^{1/3} - \text{ poids initial}^{1/3}) / \text{durée en degrés jours}$
Traçabilité	Aptitude à retrouver l'historique de l'utilisation, la localisation ou encore des résultats de contrôle d'une entité au moyen de données enregistrées.
UVC	Unité de vente au consommateur
VB	Valeur biologique des protéines $\frac{\text{Accrétion protéique corrigée (pertes métaboliques et endogènes)}}{\text{protéines absorbées}} * 100$ <p>la VB varie en fonction de la teneur du régime en protéines. Elle est caractéristique d'une source protéique et traduit l'utilisation métabolique des protéines. La VB d'un mélange n'est pas égale à la moyenne pondérée de ses ingrédients (complémentarité des teneurs en AAI).</p>
VFI	Quantité d'aliment ingérée volontairement ou voluntary food intake

Annexe 2 : Equivalences des noms de poissons

Nom français	Nom anglais	Nom latin
Anchois	Anchovy	<i>Engraulis ringens</i>
Anguille européenne	European eel	<i>Anguilla anguilla</i>
Bar européen	Sea-bass	<i>Dicentrarchus labrax</i>
Capelan	Capelin	<i>Mallotus villosus</i>
Carpe commune	Common carp	<i>Cyprinus carpio</i>
chinchard	Horse mackerel	
Daurade royale	Gilthead seabram	<i>Chrysophrys aurata</i>
Eglefin	Haddock	<i>Gadus eglefinus</i>
Flétan	Halibut	<i>Hypoglossus sp.</i>
Grande argentine	Great silver smelt	<i>Argentina silus</i>
Hareng	Herring	<i>Clupea harengus</i>
krill	krill	<i>Euphasia superba</i>
Lançon	Sandeel	<i>Ammodytes tobianus</i>
Maquereau bleu	Blue mackerel	<i>Scomber sp.</i>
Menhaden	menhaden	<i>Brevoortia sp.</i>
Merlan bleu	Blue whiting	
Morue	cod	<i>Gadus morhua</i>
Plie	plaice	<i>Pleuronectes platessa</i>
Sardine	pilchard	<i>Sardina pilchardus</i>
Saumon argenté (coho)	Coho salmon	<i>Onchorhynchus kisutch</i>
Saumon de l'atlantique	Atlantic salmon	<i>Salmo salar</i>
Saumon du pacifique	Pacific salmon	<i>Oncorhynchus sp.</i>
Sprat	sprat	<i>Sprattus sprattus</i>
Tacaud norvégien	Norway pout	<i>Trisopterus luscus</i>
Truite commune	Brown trout	<i>Salmo truta</i>
Truite Arc en ciel	Rainbow trout	<i>Onchorhynchus mykiss</i>

Annexe 3 : Bibliographie

- 1 - Ackman R.G., Takeuchi. *Nutritional composition of fats in seafoods*. 1986. *Lipids*. 21. 117-118.
- 2 - Ackman R.G., Takeuchi. *Comparison of fatty acids and lipids of smolting hatchery fed and wild Atlantic salmon*. 1986. *Lipids*. 21. 118-120.
- 3 - Ackman R.G. *Fish lipids, part I*. 1980. Adv. in fish sci. and tech. (Conell Editions), Farnham, England. Fishing News book, Ltd. 86-103.
- 4 - Ackman R.G. *Nutritional composition of fats in seafoods*. 1989. *Progr. Food Nutr-Sci.* vol 13. 161-241.
- 5 - Ackman R.G. *Seafoods lipids*. 1994. *Seafoods; chemistry, Processing, Technology and Quality*. Blackie academic and professional. 34-45.
- 6 - Alver M.O., Alfredsen J.A., Sigholt T.. *Dynamic modelling of pellet distribution in Atlantic salmon (Salmo salar L.) cages*. 2004. *Aquacultural Engineering*. 31. 51-72.
- 7 - Andersen F., Lygren B., Maage A., Waagbø R.. *Interaction between two dietary levels of iron and two forms of ascorbic acid and the effect on growth, antioxidant status and some non-specific immune parameters in Atlantic salmon (Salmo salar) smolts*. 1998. *Aquaculture*. 161. 437-451.
- 8 - Audic M. *Grilles d'audit*. 2004. Armoric Meralliance. Non publié.
- 9 - Audic M. *Rapport d'audit visite ferme Grieg*. 2003. Armoric Meralliance. Non publié.
- 10 - Audic M., Grosdemange A-G. . *Rapport d'audit visite ferme Salmar*. 2004. Armoric Meralliance. Non publié.
- 11 - Azevedo P., Bureau D.P., Leeson S., Young C. *Growth and efficiency of feed usage by Atlantic salmon (Salmo salar) fed diets with different dietary protein: Energy ratios at two feeding levels*. 2002. *Fisheries Science*. 68(4). 878-888.
- 12 - Baeverfjord G., Krogdahl, A. *Development and regression of soybean meal induced enteritis in Atlantic salmon, Salmo salar L., distal intestine: a comparison with the intestines of fasted fish*. 1996. *J. Fish Dis*. 19. 375-387.
- 13 - Bakke-McKellep A.M., Nordrum S., Krogdahl A., Buddington RK. *Absorption of glucose, amino acids, and dipeptides by the intestines of Atlantic salmon (Salmo salar)*. 2000. *Fish Physiol Biochem*. 22 (1). 33-44.
- 14 - Balfry S.K., Richardson N., Mann J., Higgs D.A. *Effects of alternate supplemental dietary lipids on the health and growth of adult sablefish (Anoplopoma fimbria)*. 2003. *Aquaculture Canada congress, Victoria conference centre, October 29 to November 2*. 53.

- 15** - Bastarache S., Chopin T., Beleya E., Stewart I., Fitzgerald P. *Enhancement in the culture of kelp (Laminaria saccharina), the extractive inorganic component of an integrated aquaculture system*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference centre, October 29 to November 1. p110.
- 16** - Beback-Williams J . *Infectious and metabolic disease in coldwater recirculation facilities*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. p83.
- 17** - Bell J. G., Henderson R. J., Tocher D. R., McGhee F., Dick J. R., Porter A., Smullen R. P., & Sargent, J. R. *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*. 2002. Journ. of Nutr. 132. 222-230.
- 18** - Bell J.G *et al* . *Altered fatty acid compositions in Atlantic Salmon (Salmo salar) fed diets containing linseed and rapeseed oils can be partially restored by a subsequent fish oil finishing diet*. 2003. Am. Soc. Nutr. Sci. 2793-2801.
- 19** - Bell J. G., McEvoy J., Tocher D.R., McGhee F., Campbell P. J., Sargent J. R. . *Replacement of fish oil with rapeseed oil in diets of Atlantic salmon (Salmo salar) affects tissue lipid compositions and hepatocyte fatty acid metabolism*. 2001. Journ. of Nutr. 131. 1535-1543.
- 20** - Bell J. G., McGhee F., Campbell P. J., Sargent J. R. *Rapeseed oil as an alternative to marine fish oil in diets of postsmolt Atlantic salmon (Salmo salar): Changes in flesh fatty acid composition and effectiveness of subsequent fish oil wash out*. 2003. Aquaculture. 218. 515-528.
- 21** - Bencze Røra A.M., Birkeland S., Hultmann L., Rustad T., Skara T., Bjerkeng B. *Quality characteristics of farmed Atlantic salmon (Salmo salar) fed diets high in soybean or fish oil as affected by cold-smoking temperature*. 2004. Lebensm.-Wiss. u.-Technol.
- 22** - Bencze Røra A.M., Regost C., Lampe J. *Liquid holding capacity, texture and fatty acid profile of smoked fillets of Atlantic salmon fed diets containing fish oil or soybean oil*. 2003. Food Res. Int. 36. 231-239.
- 23** - Bendiksen E.A., Berg O.K., Jobling M., Arnesen A.M., Ma søval K. *Digestibility, growth and nutrient utilisation of Atlantic salmon parr (Salmo salar L.) in relation to temperature, feed fat content and oil source*. 2003. Aquaculture. 224. 283-299.
- 24** - Bendiksen E.A ., Arnesen A.M., Jobling M. *Effects of dietary fatty acid profile and fat content on smolting and seawater performance in Atlantic salmon (Salmo salar L.)*. 2003. Aquaculture. 225. 149-163.
- 25** - Berge G.E., Sveier H., Led E.. *Nutrition of Atlantic salmon (Salmo salar); the requirement and metabolic effect of lysine*. 1998. Comp. Biochem.and Phys. Part A 120. 477–485.
- 26** - Berntssen M.H.G. , Waagbo R., Toften H., Lundebye A.-K.. *Effects of dietary cadmium on calcium homeostasis, Ca mobilization and bone deformities in Atlantic salmon (Salmo salar L.) parr*. 2003. Aquac. Nutr.. 9. 175-183.

- 27** - Beurne . *Texture profile analysis*. 1978. Food technol. 7. 62-66.
- 28** - Bhandari R.K., Taniyama S., Kitahashi T., Ando H., Yamauchi K., Zohar Y., Ueda H., Urano A. . *Seasonal changes of responses to gonadotropin-releasing hormone analog in expression of growth hormone/prolactin/somatolactin genes in the pituitary of masu salmon*. 2003. Gen and Com. Endocr. 130. 55-63.
- 29** - Bjerkas E., Sveier H. . *The influence of nutritional and environmental factors on osmoregulation and cataracts in Atlantic salmon (Salmo salar L)*. 2004. Aquaculture. 235. 101-122.
- 30** - Bjerkgeng B., Refstie S., Fjalestad K.T., Storebakken T., Rødbotten M., Roem A.J. *Quality parameters of the flesh of Atlantic salmon (salmo salar) as affected by dietary fat content and full fat soybean meal as a partial substitute for fish meal in the diet*. 1997. Aquaculture. 157. 297-309.
- 31** - Bjornevik M. *White muscle fibre distribution in Atlantic salmon (Salmo salar) and Atlantic co (Gadus morhua) as affected by external factors, and relation to flesh quality*. 2003. Dr.Scient.thesis. institute of marine research (Bergen). University of Bergen (Norway).
- 32** - Blier P.U., Lemieux H., Devlin R.H. *Is the growth rate of fish set by digestive enzymes or metabolic capacity of the tissues? Insight from transgenic coho salmon*. 2002. Aquaculture. 209. 379–38.
- 33** - Botta J.R. *Freshness quality of seafoods, a review . in seafoods: chemistry, processing, technology and quality*. Shahidi F. and Botta J.R. eds, Blackie academic and professional. 140-168.
- 34** - Breck O., Bjerkas E., Campbell P., Arnesen P., Haldorsen P., Waagbo R. *Cataract preventative role of mammalian blood meal, histidine, iron and zinc diets for Atlantic salmon (Salmo salar) of different strains*. 2003. Aquac Nutr. 9. 341-350.
- 35** - Brown L. *Aquaculture for veterinarians: fish husbandry and medicine*. 1999. pergamon press.
- 36** - Buddington RK *et al* . *The intestines of carnivorous fish: structure and functions and the relations with diet..* 1997. Acta Physiol Scand. 161 (suppl 638). 67-80.
- 37** - Chamila J., Gotoh N., Wada S. *Variation in lipid classes and fatty acid composition of salmon shark (Lamna ditropis) liver with season and gender*. 2003. Comp. Biochem. and Physiol. Part B 134. 287-295.
- 38** - Chopin T. *et al*. *Developing Porphyra/ salmon integrated aquaculture for bioremediation and diversification of the aquaculture industry*. Journ of appl. Physiol. 11 : 463-472, 1999
- 39** - Christiansen R., Torrissen O.J. *Effects of dietary astaxanthin supplementation on fertilization and egg survival in Atlantic salmon (salmo salar L.)*. 1997. Aquaculture. 153. 51-62.

- 40** – Christiansen R, Struksnaes G, Estermann R and Torrissen O.J . *Assesment of flesh color in Atlantic salmon Salmo salar (L.)*. 1995. Aquacul.Fish.Manag.
- 41** - CIPA (Comité Interprofessionnel des Produits de l'Aquaculture). *Les commisions qualité sur le chemin de la Certification de Conformité Produits*.
- 42** - Codex Alimentarius, France. *Code d'usages pour une bonne alimentation animale. 2004. Codex alimentarius (CAC/RCP 54-2004)*. 1-14.
- 43** - Cowey C.B. *Some effects of nutrition. 1993. in "fish nutrition in practice"*. June 1991, Ed INRA, Paris, les colloques n 61. 24-27.
- 44** - Coyne R., Bergh Ø., Samuelsen O; Andersen K., Lunestad B.T., Nilsen H., Dalsgaard I., Smith P. *Attempt to validate breakpoint MIC values estimated from pharmacokinetic data obtained during oxolinic acid therapy of winter ulcer disease in Atlantic salmon (Salmo salar)*. 2004. Aquaculture. 238. 51-66.
- 45** - Damsgard B., Sørum U., Ugelstad I., Eliassen R.A., Mortensen A.. *Effects of feeding regime on susceptibility of Atlantic salmon (Salmo salar) to cold water vibriosis*. 2004. Aquaculture. 239. 37-46.
- 46** - Del Sol Novoa M., Capilla E., Rojas P., Baro J, Gutierrez J., Navarro I. *Glucagon and insulin response to dietary carbohydrate in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss)*. 2004. Gen and Comp Endocrinol. 139. 48-54.
- 47** - Denstadli V., Vegusdal A., Krogdahl A.M., Bakke-McKellep G.M., Berge H., Holm M. Hillestad B., Ruyter B. *Lipid absorption in different segments of the gastrointestinal tract of Atlantic salmon (Salmo salar L.)*. 2004. Aquaculture. 240. 385-398.
- 48** - Don E.Weitkamp. *State of Columbia River Estuary, Ecological conditions*. 2001.
- 49** - Dunajski E. *Texture of fish muscle*. 1979. J.Texture Studies. 10. 301-318.
- 50** - Einen O., Waagan B., Magny S. Thomassen . *Starvation prior to slaughter in Atlantic salmon (Salmo salar)*. I. *Effects on weight loss, body shape, slaughter- and fillet-yield, proximate and fatty acid composition*. 1998. Aquaculture.166. 85-104.
- 51** - Einen O., Thomassen M.S. *Starvation prior to slaughter in Atlantic salmon (Salmo salar)*. II. *White muscle composition and evaluation of freshness, texture and color characteristics in raw and cooked filets*. 1998. Aquaculture. 169. 37-53.
- 52** - Einen O., Mørkøre T., Bencze Røra A.M., Thomassen M.S.. *Feed ration prior to slaughter—a potential tool for managing product quality of Atlantic salmon (Salmo salar)*. 1999. Aquaculture. 178. 149-169.
- 53** - Espe M., Sveier H., Høgøy I., Lied E. *Nutrient absorption and growth of Atlantic salmon (Salmo salar L.) fed fish protein concentrate*. 1999. Aquaculture. 174. 119–137.
- 54** - Fauconneau B. *et al. Les lipides de dépôt chez les poissons d'élevage ; contrôle cellulaire, métabolique et hormonal*. 1990. INRA Productions Animales. 3 (5). 396-381.

- 55** - Feillet J.F. *Compte rendu de la réunion PAQ Label Rouge du 19 mars 2003*. 2003. Armoric Meralliance. Non publié.
- 56** - Fivelstad S., Waagbø R., Zeitz S.F., Diesen Hosfeld A.C., Olsen A.B., Stefansson S. *A major water quality problem in smolt farms: combined effects of carbon dioxide, reduced pH and aluminium on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts: physiology and growth*. 2003. *Aquaculture*. 215. 339–357.
- 57** – Forster J. . *Aquaculture chickens, salmon: a case study*. 1999. *World Aquac. Mag.* 30(3), 33, 35-38, 40, 69-70.
- 58** - Funk V.A., Wu S., Young C., Kreiberg H., Taylor K., Jones S. *The effect of IP vaccination and sea water entry on the immunocompetence of Atlantic salmon (*Salmo salar*)*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. 60.
- 59** - Giesse J. *Measuring physical properties of foods*. 1995. *Food Technol.* february.
- 60** - Glencross Brett D., Carter C.G., Duijster N., Evans D.R., Dods K., McCafferty P., Hawkins W.E., Maas R., Sipsas S. *A comparison of the digestibility of a range of lupin and soybean protein products when fed to either Atlantic salmon (*Salmo salar*) or rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)*. 2004. *Aquaculture*. 237. 333-346.
- 61** - Glover K.A., Nilsen F., Skaala A. *Individual variation in sea lice (*Lepeophtheirus salmonis*) infection on Atlantic salmon (*Salmo salar*)*. 2004. *Aquaculture*. 241. 701-709.
- 62** - Gomez-Requeni P., Mingarro M., Calduch-Giner J.A., Medale F., Martin S.A.M., Houlihan D.F., Kaushik S., Perez-Sanchez J.. *Protein growth performance, amino acid utilisation and somatotropic axis responsiveness to fish meal replacement by plant protein sources in gilthead sea bream (*Sparus aurata*)*. 2004. *Aquaculture*. 232. 493-510.
- 63** - Graff I.E., Waagbø R, Fivelstad S, Vermeer C, Lie Ø, KLundebye A. *A multivariate study on the effects of dietary vitamin K, vitamin D3 and calcium, and dissolved carbon dioxide on growth, bone minerals, vitamin status and health performance in smolting Atlantic salmon *Salmo salar* L.*. 2005. *Journ. of Fish Dis.* 25. 599-614.
- 64** – Greene, Selivonchick . *Lipid metabolism in fish*. 1987. *Prog.Lipid.Res.* 26. 53-85.
- 65** - Grethe R., Berg Lea T., Deacon G. *Healthy food for sustainable salmon farming*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. 44.
- 66** - Guillaume J., Kaushik S., Bergot P., Métailler R. *Nutrition et alimentation des poissons et crustacés*. 1999. INRA éditions. Ifremer. Du Labo au terrain.
- 67** - Haard . *Control of chemical composition and food quality attributes of cultured fish*. 1992. *Food.Res.Int.* 25. 1-19.
- 68** - Hardy *et al* . *Replacement of herring oil with menhaden oil, soybean oil or tallow in the diets of Atlantic salmon raised in marine net-pens*. 1987. *Aquaculture*. 65. 267-277.

- 69** - Hemre G.I., Hansen T. *Utilisation of different dietary starch sources and tolerance to glucose loading in Atlantic salmon (Salmo salar), during parr– smolt transformation.* 1995. *Aquaculture.* 161. 145-157.
- 70** - Hevrøy E.M., Sandnes K., Hemre G.–I. *Growth, feed utilisation, appetite and health in Atlantic salmon (Salmo salar L.) fed a new type of high lipid fish meal, Sea GrainR, processed from various pelagic marine fish species.* 2004. *Aquaculture.* 235. 371-392.
- 71** - Hillestad M., Johnsen F., Asgard T. *Protein to carbohydrate ratio in high-energy diets for Atlantic salmon (Salmo salar).* 2001. *Aquac. Res.* 32 (7). 517-529.
- 72** - Hirsch M. *Avis de l'AFSSA sur un projet d'arrêté modifiant l'arrêté du 2 septembre 1999 établissant des mesures de lutte contre les maladies légalement réputées contagieuses des poissons (NHI, SHV et AIS).* 2003. saisine N 2003-SA-0267. 1-2.
- 73** - Houlihan D., Boujard T., Jobling M. *Food intake in fish.* 2001. Blackwell science. chap 13. Physiological effects of feeding. 297-331.
- 74** - Huang C-H, Higgs D.A., Balfry S.K, Devlin R.H. *Effect of dietary vitamin E level on growth, tissue lipid peroxidation, and erythrocyte fragility of transgenic coho salmon, Oncorhynchus kisutch.* 2004. *Comp. Biochem. and Physiol. Part A.*
- 75** - Hydro . *Fett % i laks 1997.* 1997. Meralliance Armoric. Non publiée.
- 76** - Jacobsen J. A. and Hansen L.P. *Feeding habits of wild and escaped farmed Atlantic salmon, Salmo salar L., in the Northeast Atlantic.* 2001. *Journal of Marine Science.* 58. 916-933.
- 77** - Jacobsen J.A., Gaard E. *Open-ocean infestation by salmon lice (Lepeophtheirus salmonis): comparison of wild and escaped farmed Atlantic salmon (Salmo salar L.).* 1997. *Journ. of Marine Sci.* 54. 1113-1119.
- 78** - James H. et al . *Fish as food : aquaculture's contribution, ecological and economic impacts and contributions of fish farming and capture fisheries.* 2001. EMBO reports. 2, N 11. 958-963.
- 79** - Jensen A. *Geografisk variasjon og utviklingstrekk i norske laksebestander.* 2004. NINA (Norsk institutt for naturforskning).
- 80** - Johnston Ian A., Manthri S., Alderson R., Campbell P., Mitchell D., Whyte D., Dingwall A., Nickell D., Selkirk C., Robertson B. *Effects of dietary protein level on muscle cellularity and flesh quality in Atlantic salmon with particular reference to gaping.* 2002. *Aquaculture.* 210. 259-283.
- 81** - Kadri S. , Mitchell D.F., Metcalfe N.B., Huntingford F.A., Thorpe J.E. *Differential patterns of feeding and resource accumulation in maturing and immature Atlantic salmon, Salmo salar.* 1996. *Aquaculture.* 142. 245-257.
- 82** - Kanazawa . *Essential fatty acid and lipid requirement of fish.* 1985. *in nutrition and feeding in fish.* London, England, Academic press. 281-297.

- 83** - Katikou.P, Hughes SI, Robb D.. *Lipid distribution within Atlantic salmon (Salmo salar) fillets*. 2001. Aquaculture. 202. 89-99.
- 84** - Kaushik S.J. *Aquafeeds, formulation and Beyond*. 2004. . vol 1 issue 1.
- 85** - Kent . 1972.
- 86** – Kent . 1973.
- 87** – Kent . 1990.
- 88** - Kent . 1982.
- 89** - Kibenke M., Jones S., Traxler G . *Virus research in wild stocks of British Columbia salmon..* 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. 46.
- 90** - Kiessling *et al* . 1992.
- 91** - Kirchner S., Kaushik S., Panserat S.. *Effect of partial substitution of dietary protein by a single gluconeogenic dispensable amino acid on hepatic glucose metabolism in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss)*. 2003. Comp. Biochem. and Physiol. part A 134. 337-347.
- 92** - Kirchner S., Kaushik S., Panserat S. *Low protein intake is associated with reduced hepatic gluconeogenic enzyme expression in rainbow trout*. 2003. Journal of Nutrition,. 133. 2561-2564.
- 93** - Kofi F-A., Hughes S.G., Vandenberg G.W. *Protein retention and liver aminotransferase activities in Atlantic salmon fed diets containing different energy sources*. 1995. Comp. Biochem. and Physiol. vol 111A, N 1. 163-170.
- 94** - Kristiansen T.S. , Ferno A., Holm J.C., Privitera LL, Bakke S., Fosseidengen J.E. *Swimming behaviour as an indicator of low growth rate and impaired welfare in Atlantic halibut (Hippoglossus hippoglossus L.) reared at three stocking densities*. 2004. Aquaculture. 230. 137-151.
- 95** - Krogdahl A. *et al* . *Feeding Atlantic salmon Salmo salar L. soybean products: effects on disease resistance (furunculosis) and lysosyme and IgM levels in the intestinal mucosa*. 2001. Aquac Nutr. 6(2). 77-84.
- 96** - Krogdahl A. *et al* . *Effets of graded levels of standard soybean meal on intestinal structure, mucosal enzyme activities, ad pancreatic response in Atlantic salmon (Salmo salar)*. 2003. Aquac Nutr. 9(6). 361-371.
- 97** - Krogdahl A., Sundby A., Olli J.J. *Atlantic salmon (Salmo salar) and rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) digest and metabolize nutrients differently. Effects of water salinity and dietary starch level*. 2004. Aquaculture. 229. 335-360.
- 99** - Landon T.R., Robinson S.M.C, MacDonald B.A. and Martin J.D. *Salmon and mussels : a relationship for the (c)ages*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference centre, October 29 to November 1. 115.

- 100** - Larsen D.A., Beckman B.R., Dickhoff W.W. *The Effect of Low Temperature and Fasting during the Winter on Metabolic Stores and Endocrine Physiology (Insulin, Insulin-like Growth Factor-I, and Thyroxine) of Coho Salmon, Oncorhynchus kisutch*. 2001. Gen. and Comp. Endocrinol. 123. 308-323.
- 101** - Le Gouessant . *Compte rendu de la réunion PAQ Label Rouge du 21 novembre 2002*. 2002. Armoric Meralliance. Non publié.
- 102** - Leggatt R.A, Iwama G.K. *Glutathione and the stress response in fish*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. 62.
- 103** - LeGouvello R. *Rapport d'audit filière Salmar/meralliance*. 2004. Armoric Meralliance. Non publié.
- 104** - Li Peng, Wang X., Hardy R.W., Gatlin D.M. III . *Nutritional value of fisheries by-catch and by-product meals in the diet of red drum (Sciaenops ocellatus)*. 2004. Aquaculture. 236. 485-496.
- 105** - Lie *et al.* *Growth and chemical composition of adult Atlantic salmon fed dry and silage based diets*. 1988. Aquaculture. 69. 343-353.
- 106** - Liu Kenneth K.M., Barrows F.T., Hardy R.W., Dong F.M. *Body composition, growth performance, and product quality of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) fed diets containing poultry fat, soybean/corn lecithin, or menhaden oil*. 2004. Aquaculture. 238. 309-328.
- 107** - Lutheri P., Carvalho A.P, Malcata F.X. *Effect of culture media on production of poly unsaturated fatty acids*. 2000. Cryptogae, Algol. 21 (1). 59-71.
- 108** - LYGREN B., SVEIER H., HJELTNES B., WAAGBØ R. *Examination of the immunomodulatory properties and the effect on disease resistance of dietary bovine lactoferrin and vitamin C fed to Atlantic salmon (Salmo salar) for a short-term period*. 1999. Fish & Shellfish Immunol. 9. 95-107.
- 109** - Lygren B., Hamre K., Waagbo R. *Effect of induced hyperoxia on the antioxydant status of Atlantic salmon, Salmo salar L., fed three different levels of dietary vitamin E*. 2000. Aquac. Res. 31. 401-407.
- 110** - Mathews S.B, Buckley R.. *Marine mortality of Puget sound coho salmon (Onchorhynchus kisutch)*. 1976. J.Fish.Res.Bd Canada. 33. 1677-1684.
- 111** - Menoyo D., Lopez-Botea C.J., Bautistab J.M, Obach A. *Growth, digestibility and fatty acid utilization in large Atlantic salmon (Salmo salar) fed varying levels of n-3 and saturated fatty acids*. 2003. Aquaculture. 225. 295-307.
- 112** - Mills D. *Salmon and trout*. 1971. Oliver and Boyd. Edimburg.
- 113** - Ministère de l'agriculture . *Cahier des charges de l'aquaculture biologique*. 2001

- 114** - Mjaavatten O., Levings C.D., Poon P. *Variation in the fatty acid composition of juvenile chinook and coho salmon from Fraser river estuary determined by multivariate analysis; role of environment and genetic origin.* 1998. *Comp. Biochem. and Physiol. Part B* 120. 291-309.
- 115** - Mørkøre T., Austreng E. *Temporal changes in texture, gaping, composition and copper status of Atlantic salmon (*Salmo salar*, L) fed moist feed or extruded dry feed.* 2004. *Aquaculture.* 230. 425–437.
- 116** - Mørkøre T., Rørvik K.E. *Seasonal variations in growth, feed utilisation and product quality of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) transferred to seawater as S0 smolts or S1 smolts.* 2001. *Aquaculture.* 199. 145 - 157.
- 117** - Morris P.C., Beattie C., Elder B., Finlay J., Gallimore P., Jewison W., Lee D., Mackenzie K., McKinney R., Sinnott R., Smart A., Weir M. *Effects of the timing of the introduction of feeds containing different protein and lipid levels on the performance and quality of Atlantic salmon, *Salmo salar*, over the entire seawater phase of growth.* 2003. *Aquaculture.* 225. 41-65.
- 118** - Moya-Falcon C., Hvattum E., Dyrby E., Skorve J., Stefansson S.O., Thomassen M.S., Jakobsen J.V., Berge R.K., Ruyter B. *Effects of 3-thia fatty acids on feed intake, growth, tissue fatty acid composition, h-oxidation and Na⁺,K⁺-ATPase activity in Atlantic salmon.* 2004. *Comp. Biochem. and Physiol. part B.* 1-12.
- 119** - Mundheim H., Aksnes A., Hope B. *Growth, feed efficiency and digestibility in salmon (*Salmo salar* L.) fed different dietary proportions of vegetable protein sources in combination with two fish meal qualities.* 2004. *Aquaculture.* 237. 315-331.
- 120** - NASCO/ISFA Liaison Group . *Report of the Sub Group on Salmon Co-operation (SalCo-Op).*, 2003. SLG. 4.
- 121** - National Research Council . *Nutrient requirements of fish.* 1993. National Academy Press. Washington.
- 122** - Nordgarden U., Hemre G.I, Hansen T. *Growth and body composition of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr and smolt fed diets varying in protein and lipid contents.* 2002. *Aquaculture.* 207. 65-78.
- 123** - Nordrum S., Bakke-McKellep A.M., Krogdahl A., Buddington R.K. *Effects of soybean meal and salinity on intestinal transport of nutrients in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*).* 2000. *Comp. Biochem. and Physiol. Part B* 125. 317–335.
- 124** - Olsen R.E., Henderson R.J., Sountama J., Hemre G.-I., Ringo E., Melle W., Tocher D.R. *Atlantic salmon, *Salmo salar*, utilizes wax ester-rich oil from *Calanus finmarchicus* effectively.* 2004. *Aquaculture.* 240. 433-449.
- 125** - Opstvedt J., Aksnes A., Hope B., Pike I.H. *Efficiency of feed utilization in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with increasing substitution of fish meal with vegetable proteins.* 2003. *Aquaculture.* 221. 365-379.

- 126** - PAQ . *Cahier des charges 94-04*, Saumon fumé Label Rouge.
- 127** - Pearce C.M. , Daggett T.L., Robinson S.M.C. *Effect of binder type and concentration on prepared feed stability and gonad yield and quality of the green sea urchin, Strongylocentrotus droebachiensis*. 2002. *Aquaculture*. 205. 301-323.
- 128** - Pennell W. *Principles of salmonid culture*. 1996.
- 129** - Peterson I., Wroblewski J.S.. *Mortality rate of fishes in the pelagic ecosystem*. 1984. *Can.J.Fish.Aquat.Sci.* vol 41. 1117-1120.
- 130** - Pike I.H. *Impact de l'aquaculture sur les stocks halieutiques*. 2004. Dossiers de l'Environnement de l'INRA, N 26. 7-17.
- 131** - Plumb J.A. *Health maintenance and principal microbial diseases of cultured fishes*. 1999.
- 132** – Polvi, Ackman R.G. *Atlantic salmon muscle lipids and their responses to alternative dietary fatty acid sources*. 1992. *J.Agric-Food Chem.* vol 40. 1001-1007.
- 133** - Radix.V . *Etude sur l'huile des aliments/ la chair des saumons*. 2001. société Armorik Meralliance. Non publié.
- 134** - Refstie S., Olli J.J, Standal H. *Feed intake, growth, and protein utilisation by post-smolt Atlantic salmon (Salmo salar) in response to graded levels of fish protein hydrolysate in the diet*. 2004. *Aquaculture*. 239. 331-349.
- 135** - Refstie S., Korsøen Ø.J., Storebakken T., Baeverfjord G., Lein I., Roem A.J. *Differing nutritional responses to dietary soybean meal in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) and Atlantic salmon (Salmo salar)*. 2000. *Aquaculture*. 190. 49-63.
- 136** - Refstie S, Storebakken T., Baeverfjord G., Roem A.J. *Long-term protein and lipid growth of Atlantic salmon (Salmo salar) fed diets with partial replacement of fish meal by soy protein products at medium or high lipid level*. 2001. *Aquaculture*. 193. 91-106.
- 137** - Regost C, et al. *Influence du taux de lipides alimentaires et du jeûne sur la qualité de la truite fario en mer*. 2002. *Aquaculture*. 193. 325-345.
- 138** - Regost C. et al . *Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in Turbot. 2 flesh quality properties*. 2003. *Aquaculture*. 220, issues 1-4. 737-747.
- 139** - Regost C., Jakobsen J. V., Røra A.M.B. *Flesh quality of raw and smoked filets of Atlantic salmon as influenced by dietary oil sources and frozen storage*. 2004. *Food Res. Int.* 37. 259–271.
- 140** - Relot A. *Rapport d'audit du voyage en Norvège semaine 36*. 2002. Armorik Meralliance. Non publié.
- 141** - Relot A. *Rapport d'audit du 3 09 02, Grieg Seafood*. 2002. Armorik Meralliance. Non publié.

- 142** - Relot A. *Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'agronomie approfondie, spécialisation halieutique : maîtriser les conditions d'élevage chez les fournisseurs : un gage de qualité pour le saumon fumé*. 2002. Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes. Non publié. 35-43.
- 143** - Rideou D. *The future of food safety in aquaculture*. 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 2. 44.
- 144** - Robb D. *Compte rendu de l'essai Grieg Meralliance*. 2003. Meralliance. Non publié.
- 145** - Robb D.H.F., Kestin S.C, Warriss P.D., Nute G.R.. *Muscle lipid content determines the eating quality of smoked and cooked Atlantic salmon (*Salmo salar*)*. 2002. Aquaculture. 202. 345-358.
- 146** - Rodnick KJ *et al* . *Thermal tolerance and metabolic physiology among redband trout populations in south eastern Oregon*. 2004. Journ Fish Biol. 64. 310-335.
- 147** - Rumsey, G.L., Siwicki, A.K., Anderson, D.P., Bowser,P.R. *Effect of soybean protein on serological response, non-specific defense mechanisms, growth, and protein utilization in rainbow trout*. 1994. Vet. Immunol. Immunopathol. 41. 323–339.
- 148** - Sabaut J.J . *La lettre du CIPA (Comité Interprofessionnel des Produits d'Aquaculture)*,. 2001.
- 149** - Sanden M., Frøyland L., Hemre G-I. *Modulation of glucose-6-phosphate dehydrogenase, 6-phosphogluconate dehydrogenase and malic enzyme activity by glucose and alanine in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. hepatocytes*. 2003. Aquaculture. 221. 469-480.
- 150** - Sargent J. R., Bell J. G., McEvoy L., Tocher D., Estevez A. *Recent developments in the essential fatty acid nutrition in fish*. 1999. Aquaculture. 177. 191-199.
- 151** - Schram T.A., Knutsen J. A., Heuch P. A., and Mo T. A.. *Seasonal occurrence of *Lepeophtheirus salmonis* and *Caligus elongatus* (Copepoda: Caligidae) on sea trout (*Salmo trutta*), off southern Norway*. 1998. Journ. of Marine Sci. 55. 163-175.
- 152** - Shenzying Z. *Adipocytes and lipid distribution in the muscle tissue of Atlantic salmon*. 1996. Can J.Fish, Aquat-Sci. 53. 326-332.
- 153** - Sheridan MA., MommsenTP. *Effects of nutritional state in vivo lipid and carbohydrate metabolism of coho salmon, *Onchorhynchus kisutch**. 1991. Gen Comp Endocrinol. Mar;81 (3). 473-83.
- 154** – Sigurgisladottir, Palmadottir . *Fatty acid composition of 35 Icelandic fish species*. 1993. *J.Amer.Oil.Chemist.Soc.* vol 70. 1081-1087.
- 155** - Sigurgisladottir *et al*. *Salmon quality: methods to determine the quality parameters*. 1997. *Reviews in Fisheries science*. 5 (issue 3). 223-252.
- 156** - Sigurgisladottir *et al* . *Texture as a parameter for Atlantic salmon and importance of the sampling method*. 1995. Unpublished results.

- 157** - Skonberg *et al.* . *Effects of feeding high monounsaturated sunflower oil diet on sensory attributes of salmonid fishes.* 1993. J.Aquac.Food.prod.Technol. 2. 117-133.
- 158** - Smith I.P., Metcalfe N.B., Huntingford F.A.. *The effects of food pellet dimensions on feeding responses by Atlantic salmon (Salmo salar L.) in a marine net pen.* 1995. IFI Medd. 130. 167-175.
- 159** - Sorensen G. *Brug af NIR, NIT og NMR til Bestemmelse af % fet, % protein og % sild.* 1994. report from the Technlo. Laboratory, ministry of fisheries. N B520.
- 160** - Spare D. *Prevention and treatment strategies for Microsporidial Gill Disease (Loma salmonae), of B.C. farmed Chinook salmon: an update on project Loma.* 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. 46.
- 161** - SQS . *Cahier des charges Label Rouge, Saumon frais d'Ecosse.*
- 162** - Stewart ARJ . *Disaggregation rates of extruded salmon feed pellets: influence of physical and biological variables.* 2002. Aquac Res. vol 33. 799.
- 163** - Storebakken .Akvaforsk. 2004. Oral comm..
- 164** - Storebakken T., Shearer K.D., Baeverfjord G., Nielsen B.G., Asgard T., Scott T., De Laporte A.. *Digestibility of macronutrients, energy and amino acids, absorption of elements and absence of intestinal enteritis in Atlantic salmon, Salmo salar, fed diets with wheat gluten.* 2000. Aquaculture. 184. 115-132.
- 165** - Storebakken T., Baeverfjord G., Skrede A., Olli J.J., Berge G.M. *Bacterial protein grown on natural gas in diets for Atlantic salmon, Salmo salar, in freshwater.* 2004. Aquaculture.
- 166** - Sveier H., Raae A.J, Lied E. *Growth and protein turnover in Atlantic salmon / Salmo salar L. ; the effect of dietary protein level and protein particle size.* 2000. Aquaculture. 185. 101-120.
- 167** - Sveier H., Wathne E., Lied E. *Growth, feed and nutrient utilisation and gastrointestinal evacuation time in Atlantic salmon / Salmo salar L. : the effect of dietary fish meal particle size and protein concentration.* 1999. Aquaculture. vol 180. 265-282.
- 168** - Telfer TC., Beveridge MC. *Practical experiences: the northern European perspective.* 2003. Institute of aquaculture, University of Stirling.
- 169** - Thodesen J., *et al.* . *Feed intake growth and feed utilisation of offspring from wild and selected Atlantic salmon.* 1999. Aquaculture. 180, issue 3-4, akvaforsk.
- 170** – Thomassen, Austreng . *Sunne fettsyrer i norsk opprettsfisk.* 1986. Norsk Fiskeoppdrett. 11. 47.
- 171** – Thomassen, Bencze . *Sluttrapport fett og Kvalitet.* . Institute for akvakulturforskning. report n 1402-605.006, As, Norway.

- 172** – Thomassen, Rosjo . *Different fats in feed for salmon. Influence on sensory parameters, growth rate and fatty acids in muscle and heart.* 1989. aquaculture. vol 79. -185.
- 173** – Thomassen, Rosjo . *Different fats in feed for salmon : influence on sensory parameters, growth rate and fatty acids in muscle and hearth.* 1989. Aquaculture. vol 79. 129-135.
- 174** - Thurow F. *On food behaviour and populations mechanisms in Baltic salmon.* 1968. LFI Medd. 1968/4. janv-16.
- 175** - Tocher D.R., Bell J.G., MacGlaughlin P., McGhee F., Dick J.R. *Hepatocyte fatty acid desaturation and polyunsaturated fatty acid composition of liver in salmonids: effects of dietary vegetable oil.* 2001. Comp. Biochem. and Physiol. Part B 130. 257-270.
- 176** - Torrissen K.R., Lied E., Espe M. *Differences in amino acid metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and Arctic charr (*Salvelinus d'inus* L.) with genetically different trypsin isozymes.* 1995. Aquaculture. 137. 187-192.
- 177** - Torrissen O.J, *et al* . *Pigmentation of salmonids. Carotenoid deposition and metabolism.* 1989. CRC Crit.Rev.Aquatic Sci. vol 1. 209-225.
- 178** - Torstensen B.E., Frøyland L., Ørnstrud R., Lie Ø.. *Tailoring of a cardioprotective muscle fatty acid composition of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed vegetable oils.* 2004. Food Chem. 87. 567–580.
- 179** - Torstensen, B.E, Lie Ø, Hamre, K. *A factorial experimental design for investigation of effects of dietary lipid content and pro-and antioxidants on lipid composition in Atlantic salmon (*Salmo salar* tissues) and lipoproteins.* 2001. Aquaculture nutrition. 7. 265-276.
- 180** - Turner R. *Offshore mariculture: site evaluation.* 2000. CIHEAM- Options méditerranéennes.
- 181** - Turner R. *Offshore mariculture: mooring system design.* . CIHEAM- Options méditerranéennes. 159-172.
- 182** - VALDIMARSSON SVEINN K. & NEIL B. METCALFE . *Is the level of aggression and dispersion in territorial fish dependent on light intensity?.* 2001. Animal Behaviour. 61. 1143-1149.
- 183** - Vanderberg G.W., Dallaire V., Scott S.L., and De La Noüe J. *Encapsulation of microbial phytase : effects on phosphorus bioavailability in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*).* 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference centre, October 29 to November 3. 54.
- 184** - Vangen B., Hemre G-I. *Dietary carbohydrate, iron and zinc interactions in Atlantic salmon (*Salmo salar*).* 2003. Aquaculture. 219. 597-611.
- 185** - Waagbo *et al.* *Chemical and sensory evaluation of filets from Atlantic salmon fed tree levels of n-3 poly unsaturated fatty acids at two levels of vitamin E.* 1993. Food Chemistry. 46. 361-366.

- 186** - Waagbø R., Hamre K., Bjerkas E, Berge R, Wathne E, Lie Ø, Torstensen B. *Cataract formation in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolt relative to dietary pro- and antioxidants and lipid level.* 2003. Journal of Fish Diseases. 26. 213-229.
- 187** - Waagbø R., Sandnes K., Sandvin A., Lie Ø . *Feeding three levels of n 3 polyunsaturated fatty acids at two levels of vitamin E to Atlantic salmon (*Salmo salar*). Growth and chemical composition..* 1991. Fiskeridirektoratets Skrifter Serie Ernaering,. 4. 51-63.
- 188** - Wagner G.N., Balfry S.K., Higgs D.A., Lall S.P., Farrell A.P.. *Dietary fatty acid composition affects the repeat swimming performance of Atlantic salmon in seawater.* 2004. Comp. Biochem. and Physiol. Part A 137. 567-576.
- 189** – Wall, Bjerkas. *A simplified method of scoring cataracts in fish.* 1999. Bull. Eur. Assoc. Fish Pathol. 19. 162-165.
- 190** - Wheatley S.B., McLaughlin M.F., Menzies F.D., Goodall E.A. *Site management factors influencing mortality rates in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during marine production.* 1995. Aquaculture. 136. 195-207.
- 191** - Wilson R P. *Handbook of nutrient requirements on finfish.* 1992. CRC Press.
- 192** - Yannong R.P.E . *Emerging disease patterns in warm water recirculation facilities.* 2003. Aquaculture Canada congress, Victoria conference center, october 29 to november 1. 83.
- 193** - Zheng X., Tocher D.R, Dickson C.A., Bell J.G., Teale A.J. *Effects of diets containing vegetable oil on expression of genes involved in highly unsaturated fatty acid biosynthesis in liver of Atlantic salmon (*Salmo salar*).* 2004. Aquaculture. 236. 467-483.
- 194** - *Etude consommateurs sauvage/élevage.* 2003. Que choisir. mai, vol 404.
- 195** - . Process alimentaire. supplément "ingrédients santé". 2003
- 196** - *San Juan County and salmon: a review.*
- 197** - *lettre d'information Le Gouessant.* . inf'eau. 6. 2001.
- 198** - *Etude de l'impact du mode d'abattage des saumons et de leur date de mise à l'eau sur les qualités intrinsèques de la matière première.* 2002. rapport de la société Technologies de Pointe et Applications. mars-02.