



Une nouvelle stratégie alimentaire pour l'élevage du porc en croissance : l'utilisation des acides gras n-3 à longue chaîne pour améliorer la déposition de la protéine musculaire

Rapport final

Dre Carole Thivierge, agr., Ph.D.¹

Dr Pierre Julien, Ph. D.²

Dr Yvon Couture, D.M.V.³

Collaborateurs:

Janie Lévesque, agr., M. Sc.⁴

Robert Fillion, agr.⁵

Septembre 2009

¹ Rowett Institute of Nutrition and Health, University of Aberdeen, Scotland

² Centre de recherches sur les maladies lipidiques, CRML/CHUL

³ Faculté de médecine vétérinaire, Université de Montréal

⁴ Agronome consultante R&D

⁵ Centre de développement du porc du Québec inc.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Répondant : Dre Carole Thivierge, Ph.D., Rowett Institute of Nutrition and Health, University of Aberdeen, Écosse, Grande-Bretagne

Assistants de recherche : Janie Lévesque, M. Sc., agronome consultante
Robert Fillion, agr., Centre de développement du porc du Québec inc.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Chercheur principal : Dre Carole Thivierge, Ph. D., Rowett Institute Nutrition and Health, University of Aberdeen

Co-investigateur : Dr Pierre Julien, Ph. D., Centre de recherches sur les maladies lipidiques, CRML/CHUL

Collaborateur : Dr Yvon Couture, D.M.V., Faculté de médecine vétérinaire, Université de Montréal

ÉQUIPE DE RÉDACTION

Dre Carole Thivierge, Ph. D., Rowett Institute of Nutrition and Health, University of Aberdeen
Janie Lévesque, agronome consultante
Monia Tremblay, CDPQ

SITE EXPÉRIMENTAL

Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD)

EXPERTISE STATISTIQUE

Gaétan Daigle, M. Sc. P. Stat., Service de consultation statistique, Département de mathématiques et statistique, Université Laval.

FINANCEMENT DE LA RECHERCHE

Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie et du Canada (CRSNG)

Programme : Recherche et développement en collaboration

Partenaires privés : Centre de développement du porc du Québec inc. (CDPQ),
Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ),
Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ)

Commanditaire de l'huile : Omega Protein Inc., Reedville VA, Etats-Unis
de menhaden

Autres collaborateurs : Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD),
Faculté de médecine vétérinaire, Université de Montréal

REMERCIEMENTS

Des remerciements spéciaux sont attribués à ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la présente étude: Mesdames Sarah Fillion, Line Leblanc, Véronique Trotier, Miriam Verville, Messieurs Pierre Baril, Réjean Groleau, Guy Julien du CRSAD et Monsieur Richard Prince de l'Université Laval pour leurs supports durant la phase animale. Madame Line Berthiaume et Messieurs François Cadelis de même que Bruno Marcotte du Centre de recherche sur les maladies lipidiques du CHUL pour leurs expertises respectives lors des analyses de la composition en acides gras des échantillons lipidiques, les analyses d'insuline, de glucose et d'urée sanguine. Mesdames Micheline Gingras et Francine Giguère du département des sciences animales de l'Université Laval sont remerciées pour leurs expertises lors des analyses des acides aminés plasmatiques et les analyses chimiques des aliments. Une appréciation spéciale est accordée à Monsieur Éric Lemieux et l'équipe d'Unicoop ainsi qu'à Madame Monique Bérard de la Fédération des producteurs de porcs du Québec - encan électronique pour leurs contributions à cette recherche. Monsieur Robert Fillion et Madame Monia Tremblay du CDPQ, Monsieur Jérôme-Alexandre Maltais et Madame Andréanne Caron, étudiants travaillant au CDPQ pour l'été, pour leurs aides apportées à différents moments durant la conduite de cette étude. Finalement, de sincères remerciements sont attribués à l'entreprise Omega Protein Inc., Reedville VA, qui a accepté de fournir l'huile de menhaden pour la réalisation de cette expérience.

Ce projet a été rendu possible grâce au soutien notamment du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) et des conseils sectoriels de l'Ontario, de l'Alberta et de la Saskatchewan. Le financement est issu du Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.



© Centre de développement du porc du Québec inc.

Dépôt légal 2009

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

ISBN 978-2-922276-30-5

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
LISTE DES TABLEAUX	v
LEXIQUE.....	vi
RÉSUMÉ.....	1
Expérience 1 – Apports alimentaires croissants d’huile de menhaden chez les porcs de 30 à 85 kg.....	2
Expérience 2 – Période de finition des porcs de 85 à 115 kg alimentés avec une ration témoin.....	2
Expérience 3 – Suivi de la qualité du gras des aliments expérimentaux	3
Conclusion sur les objectifs examinés.....	3
INTRODUCTION.....	5
HYPOTHESES.....	7
Objectif général	7
Objectifs spécifiques.....	7
MATÉRIEL ET MÉTHODES	9
Animaux et condition d’élevage	9
Dispositif expérimental, traitements et analyses des aliments.....	10
EXPÉRIENCES NUTRITIONNELLES.....	12
1 ^{re} expérience – Apports alimentaires croissants en huile de menhaden	12
2 ^e expérience – Régime de finition témoin.....	12
Fabrication des régimes expérimentaux	13
Performances zootechniques et procédure d’abattage.....	19
Biopsies musculaires et prélèvements sanguins	20
Analyses de laboratoire	21
Mortalité et traitements médicaux appliqués.....	21
Analyses statistiques	22
RÉSULTATS.....	24
Expérience 1.....	24
Expérimentation 2.....	37
DISCUSSION.....	44
Objectif spécifique 1:	44
Objectif spécifique 2:	44
Objectif spécifique 3 :	46
Objectif spécifique 4:	47
Objectif secondaire 4a :.....	49
Expérience 2 – Période de finition témoin pour tous les porcs	49
Objectif spécifique 5:	49
Expérience 3 – Essai sur la conservation des aliments expérimentaux riches en acides gras n-3 à longue chaîne.....	51
Objectif spécifique 6:	51
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	52

Entreposage et oxydation des matières grasses	52
CONCLUSION	55
CONCLUSION GÉNÉRALE	56
SUGGESTIONS POUR DES RECHERCHES FUTURES	57
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	59
ANNEXE	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:	Composition des aliments expérimentaux (tels que servis)	14
Tableau 2:	Vitamines et minéraux mineurs apportés par le prémélange	16
Tableau 3:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des huiles expérimentales	17
Tableau 4:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des aliments expérimentaux	18
Tableau 5:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des phospholipides membranaires de la longe chez les porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg ¹	25
Tableau 6:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des triglycérides intramusculaires de la longe chez des porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg ¹	27
Tableau 7:	Composition en acides gras (mg/100g de tissu frais) des phospholipides membranaires et des triglycérides intramusculaires de la longe chez des porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg ¹	29
Tableau 8:	Performances zootechniques et nutriments ingérés chez des porcs recevant des apports croissants d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg ^{1,2}	34
Tableau 9:	Performances zootechniques et nutriments ingérés chez des porcs recevant une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg ^{1,2}	38
Tableau 10:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des membranes de phospholipides de la longe chez des porcs recevant une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg ¹	40
Tableau 11:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des triglycérides intramusculaires de la longe chez des porcs recevant une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg ¹	41
Tableau 12:	Composition en acides gras (% des acides gras totaux) du gras dorsal des porcs abattus à 115 kg qui ont reçu une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg ¹	42
Tableau 13:	Indices nutritionnels de la longe considérant les lipides totaux de la longe (phospholipides et triglycérides combinés) chez des porcs abattus à 115 kg qui ont reçu une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg ^{1,2}	43

LEXIQUE

Insuline: L'insuline est une hormone responsable du taux d'utilisation du glucose, des acides aminés et de la matière grasse dans le sang par les tissus corporels, incluant les muscles. Après un repas, l'insuline est relâchée à des taux élevés et variables dans le sang selon les types de repas. Le message transmis par cette hormone aux cellules pour activer les tissus à utiliser les nutriments est appelé la **signalisation de l'insuline**.

Résistance à l'insuline (ou réduction de la sensibilité à l'insuline): Ceci est le phénomène où les tissus corporels, comme les muscles, répondent à un taux plus faible que la normale aux signaux transmis par l'insuline. Ce phénomène est aussi appelé la « résistance des tissus aux signaux de l'insuline ». La sensibilité à l'insuline est élevée en début de vie et elle diminue graduellement et continuellement avec le vieillissement ou la maturité.

Clamp métabolique: Cette technique permet de mesurer la sensibilité corporelle à l'insuline. Elle mesure directement les taux d'utilisation de glucose et des acides aminés en mg/min ou en mg/kg/min lorsque le niveau de l'insuline dans le sang est élevé au moins à des niveaux atteints après un repas. Le terme **hyperinsulinémie** signifie que le niveau d'insuline dans le sang est plus élevé que la concentration de base. Le terme **euglycémie** signifie que la concentration en glucose sanguin est maintenue au niveau de base. Quant au terme **euaminoacidémie**, il se définit comme la concentration en acides aminés sanguins qui est maintenue au niveau de base durant la procédure des clamps métaboliques.

Acides gras: Ce sont les unités de base (ou les petites unités de gras) qui composent les lipides complexes par exemple les phospholipides ou les triglycérides.

Par exemple, pour l'acide gras C20:5 n-3 :

1. C20 signifie une unité d'un acide gras composé de 20 carbones;
2. : 5 indique le nombre de liens insaturés (ou de doubles liens) de l'acide gras;
3. n-3, n-6, n-9, n-7 signifient oméga-3, oméga-6, etc.

La famille des acides gras n-3 (grande famille) peut être séparée en deux sous-familles:

Les acides gras n-3 à longue chaîne (ou AGn-3LC) réfèrent, dans cette étude, à la famille des n-3 qui possèdent 20 carbones et plus. Ces derniers sont typiques des produits marins.

Deux acides gras n-3 à longue chaîne contenus dans les huiles de poisson sont reconnus pour leurs effets bénéfiques en recherche sur la santé humaine. Il s'agit de :

1. C20:5 n-3, appelé acide éicosapentaénoïque (EPA)
2. C22:6 n-3, appelé acide docosahexaénoïque (DHA)

Les acides gras n-3 à courtes chaînes réfèrent aux acides gras n-3 qui possèdent moins de 20 carbones. On les retrouve principalement dans les végétaux ou les sources animales autres que marines.

Les acides gras saturés: Ces acides gras n'ont aucun double lien (ou aucune liaison insaturée) comme par exemple, le C16:0 ou le C18:0.

Les acides gras mono-insaturés: Ces acides gras possèdent un seul double lien (ou une liaison insaturée), comme le C18:1 n-9 par exemple.

Les acides gras polyinsaturés: Ces acides gras sont ceux qui possèdent plus qu'un double lien (ou plus qu'une double liaison). Cette catégorie englobe les acides gras n-3 et n-6.

Les différentes huiles de poisson existantes contiennent des quantités variables d'acides gras n-3 à longue chaîne, ce qui leur confère des propriétés différentes. Les acides gras n-3 à longue chaîne sont représentés majoritairement par les acides gras C20:5 n-3 (EPA) et C22:6 n-6 (DHA) et à un moindre degré par le C22:5 n-3. L'huile de menhaden (poisson de l'Atlantique), qui a été employée dans cette étude, est de très grande qualité et elle contient plus de 30 % d'acides gras n-3 à longue chaîne (ce qui est une teneur élevée en ces derniers).

Les phospholipides sont des lipides de structure, ils sont les membranes des cellules. Dans la présente étude, les phospholipides totaux des muscles ont été mesurés et ils représentent la somme des structures membranaires des cellules des muscles. Les phospholipides sont composés d'une unité d'acide gras par phospholipide. On peut décrire les phospholipides membranaires comme étant une « structure en forme de sandwich avec une couche de base et une couche de dessus » pouvant être plus ou moins fluide. Ceci signifie que les signaux acheminés jusqu'aux membranes, ou des membranes jusqu'au centre des cellules peuvent se produire plus facilement avec une plus ou moins grande fluidité.

Les triglycérides représentent les principaux lipides corporels d'entreposage (sous-cutané, intra-abdominal, intramusculaire, etc.). Ils sont composés de trois unités d'acides gras par triglycéride. Ils ont des propriétés chimiques qui sont différentes des phospholipides parce qu'ils ne possèdent pas la structure en forme de « sandwich ».

Déposition corporelle (ou déposition dans un tissu) de protéines ou dépôt de muscle: Ceci est ce qui se passe lorsqu'un muscle grossit. La structure du muscle est la protéine. Ainsi, un dépôt (ou une déposition) de protéine signifie une croissance du muscle.

Dégradation des protéines: Ce terme signifie l'activité dans le muscle qui permet, entre autres, de réduire la grosseur d'un muscle. Ainsi, lorsque la dégradation des protéines augmente, ceci peut se traduire en une réduction de la masse de muscle.

Synthèse (fabrication) des protéines: Ce terme signifie l'activité dans le muscle qui permet, entre autres, de faire grossir le muscle. Ainsi, lorsque la fabrication des protéines augmente, ceci peut se traduire en une augmentation de la masse de muscle.

Indice de peroxydation: Cet indice mesure la quantité de peroxyde d'hydrogène produite lorsque les acides gras de l'huile se détériorent à cause de la lumière, la chaleur et l'oxygène (donne un goût et/ou une senteur de rancis). Cette détérioration peut survenir lorsqu'une huile contient beaucoup d'acides gras polyinsaturés. Les huiles de poisson sont riches en acides gras qui sont fortement polyinsaturés avec cinq et six doubles liaisons. Ceci rend les huiles de poisson plus susceptibles à l'oxydation et à rancir.

RÉSUMÉ

Depuis 2002, le laboratoire du Dre Thivierge a poursuivi des recherches afin de développer une nouvelle stratégie d'élevage qui permettrait d'augmenter la synthèse (fabrication) et la déposition de protéines corporelles en activant un ou des mécanisme(s) qui régule(nt) ces dernières lorsque l'animal est jeune. Ce potentiel d'activation deviendrait moins actif avec l'avancement de l'âge de l'animal et ce serait la sensibilité des muscles aux signaux envoyés par l'insuline qui deviendrait moins efficace. Les travaux antérieurs et de nature fondamentale ont montré que l'enrichissement des membranes musculaires avec des acides gras n-3 à longue chaîne augmente l'utilisation corporelle des nutriments contrôlée par l'insuline. Ce contrôle améliore l'utilisation corporelle des acides aminés et du glucose. De plus, ces effets sont dose-dépendants (réponses croissantes avec des doses croissantes).

La présente expérience à plus grande échelle a été planifiée dans la même optique que les études précédentes. Le but était d'alimenter des porcs en croissance avec des quantités alimentaires croissantes d'huile de menhaden, riche en acides gras n-3 à longue chaîne, durant les périodes de début et de croissance. Cette approche alimentaire permettait d'enrichir les phospholipides membranaires des muscles à des taux élevés en ces acides gras n-3 à longue chaîne et ensuite de mesurer les performances. L'huile de menhaden est de haute qualité et riche en ces derniers, et ceux-ci représentent plus de 30 % des acides gras de l'huile. Le dispositif expérimental a vérifié si des apports alimentaires d'huile de menhaden (0, 3, 4 %) auraient un impact sur l'utilisation corporelle des acides aminés pour soutenir la croissance. Cette dernière a été étudiée par la mesure des performances, de paramètres sanguins à jeun et les mesures des épaisseurs de la longe et du gras dorsal en utilisant un appareil à ultrasons.

Un second essai a été prévu pour évaluer l'effet du retrait alimentaire de l'huile de menhaden en période de finition sur la teneur résiduelle en acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides membranaires des muscles et des triglycérides intramusculaires chez les porcs de 85 à 115 kg. Ce retrait avait été planifié pour réduire le goût de poisson dans la viande, une fois les porcs abattus. Les effets du préconditionnement des lipides corporels avec l'huile de menhaden sur les performances de finition et les caractéristiques de la carcasse ont été mesurés, alors que les animaux étaient alimentés avec une ration de finition témoin.

Les performances en réponse à l'alimentation à l'huile de menhaden ont été évaluées chez 78 castrats dont le poids initial était de 31,8 kg. Les porcs ont été assignés à 1 des 3 traitements alimentaires isoénergétiques et isoazotés (0, 3 et 4 % d'huile de menhaden) lors de leur entrée en engraissement. La concentration nutritive des aliments expérimentaux de chaque traitement a été ajustée selon la phase alimentaire (I - début : 30-55 kg; II - croissance : 55-85 kg; III - finition : 85-115 kg). Par conséquent, les porcs assignés à un traitement alimentaire à 30 kg de poids recevaient le même traitement jusqu'à 85 kg de poids vif. Une fois le poids moyen de 85 kg atteint, tous les porcs ont reçu un aliment témoin sans huile de menhaden jusqu'au poids d'abattage de 115 kg.

En parallèle, 15 porcs ont été élevés dans un même bâtiment, et, de façon similaire aux 78 autres porcs, afin d'effectuer des biopsies musculaires. Des échantillons du muscle de la longe ont été prélevés à 55, 85 et 100 kg de poids vif et un échantillon de gras dorsal a été prélevé à 100 kg. L'élevage d'un second groupe de 15 porcs avait été prévu afin de ne pas affecter les performances des 78 porcs qui ont été gardés spécifiquement à cette fin. Pendant les périodes de début, de croissance et de finition, la quantité d'aliments servis a été mesurée chaque jour. Le poids a été mesuré aux deux semaines et les refus à des intervalles réguliers. L'ingéré et le gain moyen quotidien ainsi que la conversion alimentaire ont été mesurés pour chacune des périodes alimentaires. Les épaisseurs du muscle de la longe et du gras dorsal ont été mesurées à 55, 85 et 100 kg de poids avec un appareil à ultrason au niveau de la 3^e et de la 4^e avant-

dernières côtes. Des échantillons de sang ont été prélevés à la fin de chacune des périodes alimentaires dans un état de jeûne qui avait été initié la nuit précédente. Les indices suivants de la sensibilité corporelle à l'insuline ont été mesurés pour estimer cette dernière: concentrations à jeun de l'insuline, du glucose, de l'urée et des acides aminés. Afin de réduire la variation des paramètres mesurés dans le sang, les échantillons sanguins ont été prélevés chez des animaux à jeun malgré que les changements de sensibilité à l'insuline sont plus facilement détectés chez un animal alimenté. Lorsque les porcs ont atteint le poids de marché de 115 kg de poids vif, ils ont été envoyés à l'abattoir. Les deux groupes, de 78 et 15 porcs, ont été élevés en parallèle en utilisant les mêmes procédures. Un 3^e petit essai a été conduit pour étudier la conservation de l'intégrité des gras des aliments expérimentaux en comprimés dans les silos au cours des 27 à 49 jours d'entreposage.

Expérience 1 – Apports alimentaires croissants d'huile de menhaden chez les porcs de 30 à 85 kg

Selon les résultats de la présente étude, on constate que certains objectifs ont été réalisés lorsque les porcs recevaient des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden:

1. Des élévations importantes en acides gras n-3 à longue chaîne au dessus des niveaux de base dans les phospholipides membranaires de la longe ont été obtenues lorsque les porcs ont atteint 55 ou 85 kg.
2. Une augmentation de la déposition de muscle de la longe est observée selon la mesure d'ultrasons de l'épaisseur de la longe augmentée chez les porcs à 85 kg. Les mesures de l'épaisseur de la longe pour chacun des traitements alimentaires étaient de 55,2, 55,7 et 57,5 mm. Les gras dorsaux sont demeurés inchangés.
3. Les réductions (ou tendances) dans les concentrations à jeun de l'insuline et de certains acides aminés plasmatiques chez les porcs à 85 kg sont compatibles avec une amélioration de la sensibilité corporelle à l'insuline.
4. Les réponses tardives détectées à 85 kg mettent en lumière le fait que les réponses aux apports alimentaires en huile de menhaden requièrent un certain temps pour se traduire en des changements de performance.

Expérience 2 – Période de finition des porcs de 85 à 115 kg alimentés avec une ration témoin

1. Les performances entre 85 et 115 kg sont demeurées les mêmes, peu importe les traitements antérieurs.
2. Bien que les porcs, alimentés avec de l'huile de menhaden, aient un ingéré réduit, un gain moyen quotidien et un poids vif plus faibles que les porcs témoins à la fin de la période de croissance, ils ont repris ce retard durant la période de finition. En effet, ils performant similairement au groupe témoin durant la période de finition et les caractéristiques de la carcasse sont semblables.
3. **Indices nutritionnels de la longe des porcs expérimentaux.** L'alimentation avec l'huile de menhaden a augmenté fortement les acides gras n-3 totaux dans la longe des porcs et cette augmentation était représentée en majorité par les n-3 à longue chaîne. Une portion moyenne de 75 g de longe de porc de la présente étude traitée avec le supplément de 4 % d'huile de menhaden, et qui contient 1600 g d'acides gras totaux/100 g de longe, fournirait 71 mg d'acides gras n-3 à longue chaîne par portion. Ce qui représenterait 18% de la recommandation minimale/idéale quotidienne de 400 mg/j proposée par l'Organisation mondiale de la Santé.

Expérience 3 – Suivi de la qualité du gras des aliments expérimentaux

1. Les résultats de cet essai montrent que le gras dans les aliments expérimentaux sous forme de comprimés entreposés dans des silos, a bien conservé sa qualité. Les indices de peroxydation du gras de ces aliments n'ont pas dépassé en moyenne $15 \text{ mEq O}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ pour des périodes d'entreposage en silos de 27 à 49 jours.

Conclusion sur les objectifs examinés

Cette première recherche a permis de répondre positivement et négativement à certains objectifs initiaux de recherche. Globalement, on peut dire que les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden à des porcs en croissance augmentent la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides membranaires des muscles. Cette observation était associée à ces objectifs :

Objectif : Rehaussement de la sensibilité à l'insuline

Les apports croissants alimentaires d'huile de menhaden tendent à améliorer certains indices sanguins à jeun de la sensibilité à l'insuline de façon dose-dépendante chez les porcs à 85 kg.

Objectif : Accroître la croissance musculaire

Les apports croissants alimentaires d'huile de menhaden augmentent l'épaisseur de la longe à 85 kg de façon dépendante à la dose.

Objectif : Améliorer les performances des porcs

Les porcs qui ont reçu 3 ou 4 % d'huile de menhaden présentent une ingestion de nutriments et un gain de poids inférieurs à 85 kg.

Durant la période de finition, un aliment témoin a été offert, les porcs qui avaient été supplémentés antérieurement avec l'huile de menhaden ont repris le retard et ont démontré des performances et des carcasses similaires à celles des porcs témoins. Plus de travaux seraient requis pour établir si la réduction d'ingestion en période de croissance combinée à des classements de carcasses similaires pourraient se traduire en une augmentation de profit pour les producteurs.

Objectif : Amélioration de la conversion alimentaire, de l'efficacité d'utilisation de l'azote alimentaire et de réduction des rejets azotés

Dans l'étude actuelle, les porcs ont maintenu une conversion alimentaire similaire par comparaison avec le groupe témoin. Il en est de même pour la conversion de l'azote alimentaire en gain. La densité énergétique élevée des rations de la présente étude peut avoir contribué à la chute de gain associée à la chute d'ingestion. Davantage de travaux seront requis pour établir la concentration en énergie des rations, pour minimiser la perte de poids corporel et pour favoriser une amélioration de la conversion alimentaire (observations basées sur nos travaux antérieurs; pour plus de détails, voir recommandations à la fin du rapport). L'augmentation de l'épaisseur de la longe est un gage prometteur en ce sens.

Objectif : Établir la quantité minimale du produit requise pour maximiser les performances

Les réponses les plus élevées sont obtenues de façon consistante avec la quantité maximale d'huile de menhaden testée, soit 4 % sur une base humide, ou 1,4 % d'acides gras n-3 à longue chaîne sur une base humide.

Cette nouvelle étude souligne, pour la première fois, le potentiel des acides gras n-3 dans le développement de nouvelles technologies pouvant conduire au développement d'une diète possédant des propriétés fonctionnelles et non controversées. L'utilisation de l'huile de menhaden ou des acides n-3 à longue chaîne concentrés par les producteurs de porcs ne serait pas controversée par le consommateur, car elle serait une méthode dite « naturelle ». Cette nouvelle approche améliorerait la valeur nutritionnelle de la viande de porc, puisqu'elle apporte une « plus-value » par l'enrichissement en acides gras n-3 hautement bénéfiques à la santé humaine. Cet effet bénéfique est reconnu par plusieurs organismes internationaux de promotion de la santé humaine. Si les développements technologiques le permettent, l'utilisation de ce produit par les producteurs de porcs ira dans le sens de la tendance mondiale actuelle des marchés prônant des produits carnés à valeurs ajoutées produits selon des normes les plus naturelles.

INTRODUCTION

La résistance à l'insuline ou la diminution de la sensibilité des muscles à l'insuline est un phénomène où les tissus corporels, comme les muscles, ne répondent plus de façon normale aux signaux de cette hormone. L'insuline est responsable du taux d'utilisation par les tissus corporels, incluant les muscles, du glucose, des acides aminés et des lipides sanguins. Une sensibilité corporelle élevée à l'insuline combinée à une concentration élevée d'insuline dans le sang produit une utilisation élevée des nutriments (incluant les acides aminés). Ceci permet de répondre efficacement à des besoins d'entretien et de croissance des jeunes animaux. Ce rôle dominant de la sensibilité des muscles aux signaux de l'insuline dans les fonctions de nutrition corporelle et de croissance a engendré plusieurs travaux de recherche. Le but de ces investigations était de développer des approches afin d'améliorer la sensibilité à l'insuline chez les animaux de ferme et la croissance à différents âges (Eisemann *et al.*, 1994; Davis *et al.*, 2003; Palmquist, 2009). Le phénomène de résistance à l'insuline progresse en fonction de l'âge, de la naissance à la maturité. Étant donné que l'insuline est l'hormone qui dirige les nutriments vers des fonctions de construction de tissus, un porc croît plus vite et plus efficacement si sa musculature demeure sensible à l'insuline lorsqu'il est jeune. Il a été bien établi chez le porcelet nouveau-né que la déposition de muscle s'effectue rapidement et que ce phénomène ne se reproduit plus avec l'avancement en âge de l'animal. Cette découverte démontre que la sensibilité des muscles à l'insuline est responsable de l'utilisation à haute efficacité des acides aminés. Ainsi, cette grande sensibilité à l'insuline favorise la voie d'utilisation des acides aminés vers la croissance rapide du jeune animal et l'accélération de la déposition musculaire. Il existe différentes façons d'induire la résistance à l'insuline. Le vieillissement chez des individus minces, ou des individus qui deviennent obèses fait progresser la résistance des muscles à l'insuline. Des études ont montré que lorsque la résistance à l'insuline est induite par un surplus de poids corporel chez des rongeurs, la sensibilité des muscles à utiliser le glucose peut être améliorée par l'augmentation de la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides membranaires des muscles (Storlien *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 1994). Les mécanismes stimulés par les acides n-3 à longue chaîne chez ce type de rongeurs sont similaires à ceux qui sont responsables du déclin de la sensibilité à l'insuline associé à l'âge ou à la maturité (Eisemann *et al.*, 1997; Davis *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2008). Par conséquent, notre laboratoire a antérieurement étudié le potentiel des acides n-3 à longue chaîne afin d'empêcher ou de réduire le déclin de la sensibilité des muscles à l'insuline contrôlant la déposition de la protéine musculaire en utilisant des porcelets âgés d'un mois (Bergeron *et al.*, 2007), et des bouvillons en croissance (Gingras *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009).

La substitution isoénergétique de 4 % d'une huile témoin (60 % d'huile de coton : 40 % d'huile d'olive) par une huile de menhaden riche en acides gras n-3 à longue chaîne a augmenté la sensibilité des tissus corporels à l'insuline. En effet, l'amélioration de l'utilisation du glucose (+37 %) et des acides aminés (+108 %) a été mesurée en utilisant une technique nommée clamp hyperinsulinémique-euglycémique-euaminoacidémique (Gingras *et al.*, 2007). L'amélioration de la sensibilité des muscles à l'insuline avec l'incorporation de l'huile de menhaden au lactoreemplaceur de porcelets avait amélioré la déposition corporelle de protéines chez les porcelets nouveaux-nés (+41 %, tendance) (Bergeron *et al.*, 2007). De plus, lorsque l'huile de menhaden était ajoutée sous forme de supplément diététique, les conditions plutôt associées à la dégradation des protéines corporelles étaient réduites. Ces dernières se traduisaient principalement par une diminution des acides aminés oxydés (brulés) et une tendance vers une diminution de la dégradation des protéines corporelles (Bergeron *et al.*, 2007; Gingras *et al.*, 2007). L'augmentation de la signalisation de l'insuline (voie PKB-mTOR-

S6K) combinée à une augmentation des voies d'entrées du glucose (GLUT4; tendance) dans le muscle de bouillons expliqueraient les conditions corporelles favorisant la synthèse (fabrication) des protéines (Gingras *et al.*, 2007). Une publication récente montre que l'amélioration de la sensibilité des muscles à l'insuline répond, selon un effet dose-dépendant, à la dose alimentaire d'huile de menhaden (effet dose-dépendant) (Fortin *et al.*, 2009). Les changements dose-dépendants de la sensibilité à l'insuline étaient accompagnés d'effets dose-dépendants de la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne des membranes musculaires.

À la lumière de ces observations, il semble possible d'améliorer la sensibilité des muscles à l'insuline chez le porc en croissance. Le but de cette approche est de modifier l'utilisation corporelle des nutriments afin de soutenir des conditions corporelles de synthèse (fabrication) des protéines qui se traduiraient par une déposition accrue de muscle. Pour arriver à cette fin, de l'huile de menhaden a été offerte à des taux progressifs (de manière dose-dépendante) afin d'augmenter de façon progressive la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne des phospholipides membranaires des muscles. Cette approche permettait de faciliter l'étude quantitative des effets de l'huile de poisson et des acides gras n-3 à longue chaîne sur les performances et les paramètres sanguins.

HYPOTHESES

- Des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden (riche en acides gras n-3 à longue chaîne) à des porcs en croissance augmentent linéairement ou quadratiquement le contenu en acides gras n-3 à longue chaîne des phospholipides membranaires des muscles. Ces changements sont simultanés à une augmentation de la sensibilité des muscles à l'insuline qui se traduit en une promotion de la déposition des protéines musculaires et une amélioration des performances zootechniques.
- Le retrait de l'huile de menhaden de l'alimentation des porcs appauvrit les lipides corporels en acides gras n-3 à longue chaîne à un rythme qui est fonction du temps.

Objectif général

L'objectif à long terme de cette étude est d'améliorer la compréhension de certains mécanismes régulant la déposition de muscle par la composition en acides gras n-3 à longue chaîne des membranes des muscles. Le but est de contribuer à développer une nouvelle approche d'élevage avantageuse pour le secteur porcin et qui en même temps aura des conséquences positives sur la confiance et la perception de la viande de porc par la population. Dans cette optique, une première expérience a été planifiée pour évaluer les effets d'apports alimentaires croissants d'huile de menhaden (riche en acides gras n-3 à longue chaîne) à des porcs en croissance. Les effets des traitements ont été mesurés sur la composition en acides gras des phospholipides membranaires des muscles, sur les performances zootechniques, sur les épaisseurs de la longe et du gras dorsal ainsi que sur la concentration de différents paramètres sanguins à jeun. Simultanément, les compositions en acides gras des triglycérides intramusculaires et du gras dorsal ont été étudiées. Dans un deuxième essai, les effets du retrait de l'huile de menhaden de l'alimentation des porcs durant la période de finition ont été évalués afin de vérifier l'appauvrissement des lipides corporels en acides gras provenant de l'huile de menhaden, surtout les n-3. Le but était de prévenir la production d'une viande au goût de poisson. Par la même occasion, les performances zootechniques des porcs en période de finition ont été mesurées afin d'établir s'il persiste des effets du préconditionnement des lipides corporels des périodes de début et de croissance sur les paramètres de finition.

Objectifs spécifiques

1. Établir la quantité minimale d'huile de menhaden qui permettrait d'améliorer les performances des porcs en croissance en utilisant une courbe dose-réponse;
2. Étudier la composition en acides gras n-3 à longue chaîne des membranes des muscles et des triglycérides intramusculaires lors d'apports alimentaires croissants en huile de menhaden durant les périodes de début et de croissance. De plus, étudier l'appauvrissement de ces derniers après le retrait de l'huile de menhaden au régime des porcs lors de la finition;
3. Établir si les effets de l'huile de menhaden sur l'utilisation corporelle des nutriments sont concomitants à une amélioration de la sensibilité à l'insuline et qui est estimée par l'utilisation d'indices sanguins mesurés à jeun telle que l'insuline, le glucose, l'urée et les acides aminés;

4. Établir si les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden améliorent la synthèse (fabrication) des protéines corporelles qui se traduit en une déposition accrue de muscle en mesurant l'épaisseur de la longe tout au long de la croissance en utilisant un appareil à ultrasons;
 - a. Définir si la composition en acides gras des phospholipides membranaires de la longe s'associe à celle des globules rouges du sang et si ces derniers pourraient être utilisés comme outil estimant la composition des membranes des muscles;
5. Évaluer si les effets du préconditionnement des lipides corporels avec les apports d'huile de menhaden lors des périodes de début et de croissance persistent lors de la finition où une ration de témoin est servie. Cet objectif est réalisé en mesurant les performances des porcs, les épaisseurs de la longe et de gras dorsal et les caractéristiques de la carcasse ;
6. Mesurer la qualité des huiles et des gras des aliments expérimentaux entreposés dans des silos aux fins de l'expérimentation en utilisant la mesure d'indice de peroxydation.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Animaux et condition d'élevage

L'étude a été réalisée au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) de mai à septembre 2007 dans le bâtiment appelé « Unité de testage et d'expérimentation en alimentation porcine (UTEAP) ». Cent trente-quatre porcelets mâles castrés, issus d'un croisement de truies hybrides (Yorkshire × Large-White) et de verrats hybrides (Piétrain × Duroc) sont entrés dans la section pouponnière du bâtiment UTEAP au poids d'environ 6,0 kg. C'est en provenance d'une seule pouponnière (Ferme Serge inc., 15 rue Miquelon, Sainte-Camille) que les porcelets sevrés hâtivement ont tous fait leur entrée la même journée au bâtiment UTEAP. Les porcelets ont été adaptés à leur nouvel environnement pendant une période de 30 jours en pouponnière. Ils ont été nourris avec des aliments commerciaux à volonté et avaient accès à de l'eau en tout temps. Après cette période d'acclimatation, 93 porcelets ont été sélectionnés sur la base de leurs poids et transférés dans la section engraissement de l'UTEAP au poids moyen de 19,7 kg ± 2,2. Deux groupes similaires ont alors été formés, soit un groupe de 78 porcelets placés dans la salle #1 et un groupe de 15 porcelets placé dans la salle #2. Dans la salle #1, les 78 porcelets ont été assignés à 39 parcs de sorte à obtenir deux porcs par parc, alors que dans la salle #2, les 15 porcelets ont été assignés à 15 parcs, ce qui correspond à un animal par parc. De cette façon, un espace respectif de 1,1 et 2,2 m² par porc a été assuré durant toute la période expérimentale. Chacun des parquets était muni d'un plancher en caillebotis intégral de type béton, d'un abreuvoir économiseur d'eau (Drik-O-mat®, Farmweld, IL, USA) et d'une trémie sèche. Dans ce bâtiment, la ventilation était de type mécanique et des entrées d'air, jumelées à un conduit de recirculation, assuraient le contrôle de la qualité de l'air dans les deux salles d'engraissement. La section d'engraissement était ventilée avec des contrôleurs électroniques. Ces contrôleurs actionnent les ventilateurs, le système de chauffage et les entrées d'air à l'aide de sondes de température et d'humidité. La consigne de température variait selon le poids des porcs. Le débit de ventilation minimum était ajusté pour fournir une bonne qualité d'air, surtout par temps froid. La consommation quotidienne en eau des porcs a été mesurée grâce à l'installation de compteurs d'eau (Lecomte, modèle LR, Saint-Hyacinthe, QC) dans chacun des parcs de la salle #1. La consommation en eau pour l'ensemble des porcs de chacune des salles a également été enregistrée à l'aide d'un compteur d'eau (ABB Water Meter inc., modèle C-700M3, Ocala, FL, É.-U.) qui était installé sur la conduite de chacune des salles d'engraissement.

La température et l'humidité à l'intérieur du bâtiment ont également été enregistrées en cours d'expérimentation. Elles ont été en moyenne de 21,2 °C et de 71,1 %, respectivement pendant la période expérimentale. Elles ont toutefois varié tout au long de l'essai de 16,7 à 33,4 °C pour la température et de 29,5 à 92,5 % pour l'humidité relative (figures 1 et 2).

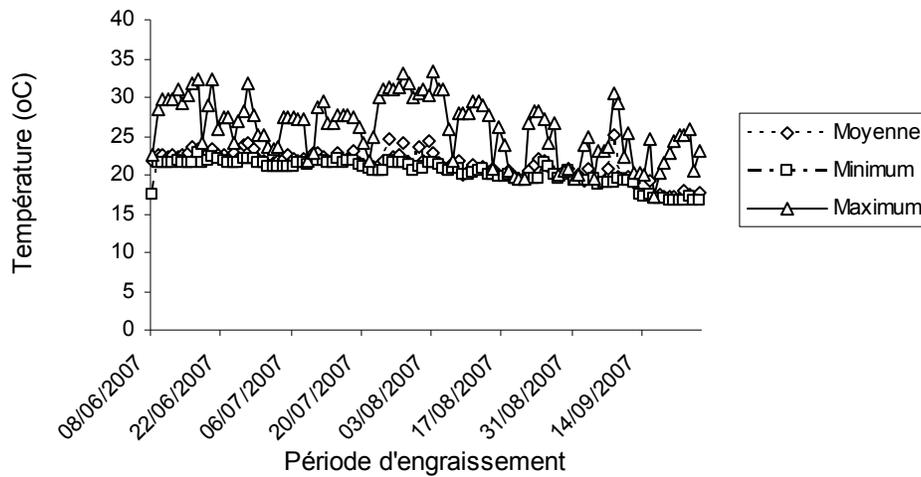


Figure 1 : Variations de la température dans les deux sections d'engraissement du bâtiment UTEAP tout au long de l'expérience

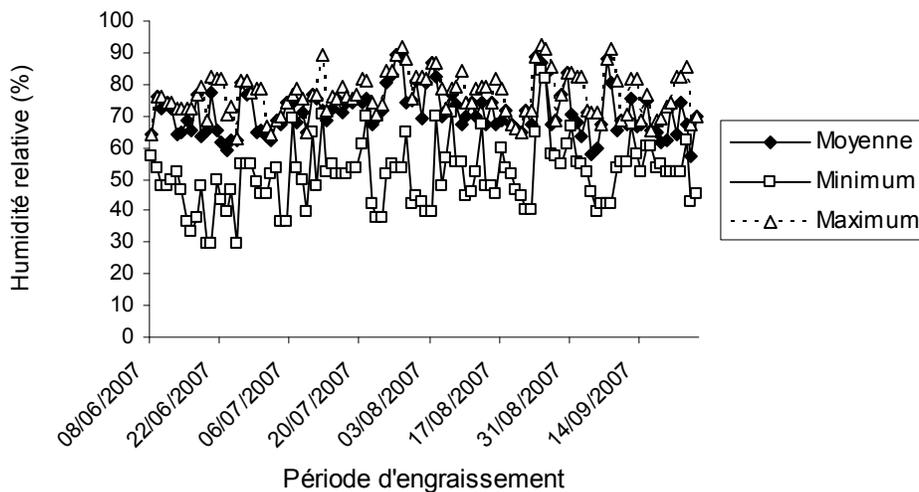


Figure 2 : Variations de l'humidité relative dans les deux sections d'engraissement du bâtiment UTEAP tout au long de l'expérience

Dispositif expérimental, traitements et analyses des aliments

Le dispositif expérimental a été planifié, de sorte à tester les effets de trois apports alimentaires croissants d'huile de menhaden (0, 3 et 4 % sur une base humide) durant les périodes de début (30-55 kg) et de croissance (55-85 kg) des porcs. Les effets des traitements sur les performances zootechniques, les paramètres sanguins à jeun sélectionnés et les épaisseurs du muscle de la longe et du gras dorsal des animaux vivants (mesures à ultrasons) ont été mesurés sur les porcs de la salle #1. Pour ce faire, un dispositif en bloc complet avec des mesures répétées à 55 et 85 kg a été utilisé. Ce dispositif a permis de tester l'effet moyen des traitements et de l'âge/la maturité (début et croissance) sur différents paramètres, et aussi de définir si les stades de croissance interagissaient avec la réponse aux traitements alimentaires (interaction traitement \times période). Le facteur de blocage était le poids initial des animaux et les traitements ont été assignés aléatoirement selon un dispositif en bloc complet. Dans ce but, deux groupes différents de porcs ont été formés. L'objectif de la formation d'un deuxième

groupe de porcs était de ne pas nuire aux performances des 78 porcs de la salle #1 par la pratique de biopsies musculaires et de pratiquer les biopsies musculaires sur le deuxième groupe de 15 porcs de la salle #2. Dans un premier temps, les 78 porcs de la salle #1 ont été réunis par groupe de six porcs de poids similaires afin de former 13 blocs complets. À l'intérieur de chaque groupe de six porcs, les animaux de poids similaires ont été réunis par groupe de deux. Ces derniers ont été répartis dans trois parcs différents créant ainsi les unités expérimentales comprenant deux porcs par parc (ou deux porcs par unité expérimentale). Par la suite, pour chacun des blocs formés de trois parcs, les trois traitements ont été assignés aléatoirement. Les performances zootechniques, les paramètres sanguins à jeun et les mesures ultrasons ont été mesurés en utilisant les animaux de la salle #1. Cette approche assurait 13 unités expérimentales (13 parcs) par traitement selon un dispositif en bloc complet dont le facteur de blocage est le poids initial. Quant à la salle #2, les 15 porcs ont été réunis par groupe de trois porcs de poids similaires afin de former cinq blocs complets. Cette expérience menée en parallèle a impliqué l'utilisation d'un animal par parc, ce qui correspond à un porc par unité expérimentale. Les trois traitements ont été assignés au hasard à un des trois parcs de chacun des blocs. Afin de vérifier les effets des traitements sur la composition en acides gras des phospholipides membranaires et des triglycérides intramusculaires de la longe et du gras dorsal, cinq unités expérimentales par traitement ont été assignées. Selon des études menées antérieurement, seulement cinq échantillons par traitement sont requis pour évaluer les effets de l'huile de menhaden sur la composition en acides gras des membranes musculaires et des triglycérides intramusculaires (Bergeron *et al.*, 2007; Gingras *et al.*, 2007). Des procédures d'élevage similaires ont été employées pour les porcs des salles #1 et #2.

EXPÉRIENCES NUTRITIONNELLES

1^{re} expérience – Apports alimentaires croissants en huile de menhaden

Des aliments servis en comprimés ont été formulés pour rencontrer ou excéder spécifiquement les besoins nutritionnels des porcs pour les stades I - début:30-55 kg et II - croissance:55-85 kg. Les spécifications nutritionnelles utilisées pour concevoir les aliments ont été celles des tables d'alimentation des porcs du CDPQ (2005) et du guide NRC (NRC, 1998). La formulation des aliments a été effectuée sur la base d'énergie nette et des acides aminés digestibles. De plus, les aliments conçus pour chacune des périodes alimentaires ont été formulés pour être isoazotés et isoénergétiques. Des régimes à base de maïs, de blé, de tourteau de soya et d'huile ont été offerts à volonté aux animaux durant toute la période expérimentale (tableau 1). Les concentrations de vitamines et de minéraux mineurs retrouvées dans les aliments sont présentées au tableau 2. Les compositions en acides gras des huiles et des aliments sont présentées aux tableaux 3 et 4. Une fois les traitements alimentaires assignés à chacun des parcs, ce même traitement alimentaire était offert de 19,7 jusqu'à 86,8 kg de poids moyen. Avant le début de l'expérience, les porcelets ont été adaptés durant 8 jours à leur régime respectif (0, 3 et 4 % d'huile de menhaden) par l'intermédiaire d'une transition alimentaire. L'aliment expérimental de début et l'aliment de pouponnière ont été offerts selon des proportions respectives de $\frac{1}{4}$ à $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{2}$ et $\frac{3}{4}$ à $\frac{1}{4}$ durant trois, deux et trois jours consécutifs, respectivement. L'aliment expérimental de début (0, 3 et 4 %) a par la suite été consommé à 100 % de l'ingestion des porcs pendant trois jours consécutifs avant le début de l'expérience débutée à 31,8 kg de poids vif. Cette transition a permis d'éviter tout problème de diarrhée. Il a été noté que les porcelets se sont rapidement habitués aux aliments contenant l'huile de menhaden. L'incorporation croissante de l'huile de menhaden aux aliments des porcs a été effectuée seulement durant les périodes de début (30-55 kg) et de croissance (55-85 kg). Cet intervalle expérimental de temps avait été prévu comme suffisant pour potentiellement détecter des effets de traitements sur les performances, les paramètres sanguins à jeun et les mesures à ultrasons. Les résultats de cette expérience sont présentés à la section « Expérience 1 » de ce rapport.

2^e expérience – Régime de finition témoin

L'huile de menhaden a été retirée des aliments des porcs à la fin de la période de croissance, soit 20 à 41 jours avant les abattages. À ce moment, les porcs pesaient 86,8 kg en moyenne. Cette démarche a été effectuée dans le but d'éviter d'obtenir une viande au goût de poisson; l'appauvrissement des carcasses en gras de poisson était nécessaire dans un certain écart. C'est pourquoi, un aliment témoin de finition a été offert à tous les porcs de 86,8 kg jusqu'à l'abattage prévu à 115 kg de poids vif. Lors de la période de finition, les performances ont été évaluées afin de vérifier si le préconditionnement des lipides membranaires des muscles par les traitements appliqués antérieurement avait encore un effet durant cette période. À cette fin, un aliment en comprimé a été formulé spécifiquement pour rencontrer ou excéder les besoins nutritionnels des porcs durant la période de finition (III-finition : 85-115 kg). Les spécifications nutritionnelles utilisées pour concevoir les aliments ont été celles des tables d'alimentation des porcs du CDPQ (2005) et du guide NRC (NRC, 1998). La formulation des aliments a été effectuée sur la base de l'énergie nette et des acides aminés digestibles (tableaux 1 et 2). Les résultats de cette expérience sont présentés à la section « Expérience 2 » de ce rapport.

Fabrication des régimes expérimentaux

La fabrication d'aliments en comprimés a été réalisée à trois dates différentes durant l'expérimentation à la meunerie de la Coopérative agricole Unicoop (Saint-Anselme, QC), pour les aliments de début, de croissance et de finition. Lors des fabrications, l'huile de menhaden a été incorporée aux aliments expérimentaux (incorporation de 3 et 4 % d'huile de menhaden sur une base humide) alors qu'un mélange d'huiles végétales a été ajouté aux aliments témoins. Les quantités d'huiles à incorporer aux aliments expérimentaux avaient été pesées avant leur transport en meunerie et placées dans des contenants de plastique hermétiques et opaques. Ces huiles ont été gardées à l'abri de la lumière et de la chaleur. L'oxydation a été minimisée en injectant de l'azote dans tous les contenants d'huile. N'étant pas des ingrédients standards utilisés en meunerie, toutes les huiles (composant le mélange d'huile témoin et huile de menhaden) utilisées dans cette étude ont été incorporées au mélangeur grâce à l'utilisation d'une pompe. Le mélange d'huile témoin était composé de 33,3 % d'huile de noix de coco, 37,0 % d'huile de palme et de 29,7 % d'huile d'olive (Pokonobe, Montréal, Québec). L'huile de menhaden était raffinée, blanchie, pressée et enrichie de 500 ppm d'éthoxiquine (Omega Protein Inc., Reedville, VA, USA). Reproduire un profil en acides gras similaire à celui du gras de porc (NRC, 1998) était l'objectif du mélange d'huiles végétales de l'aliment témoin (0 % d'huile de menhaden) pour ne pas dénaturer la sensibilité à l'insuline originale des porcs nourris avec le régime témoin. N'étant pas liquides à la température de la pièce, les huiles de palme et de noix de coco ont été légèrement chauffées juste avant la fabrication de l'aliment témoin afin de pouvoir les incorporer au mélangeur à l'aide de la pompe. Le degré d'oxydation des huiles individuelles et de celles en mélange a été mesuré avant et après la fabrication des aliments en comprimés (0, 3 et 4 % d'huile de menhaden) en effectuant en laboratoire une analyse d'indice de peroxydation. L'indice de peroxydation (AOAC méthode officielle # 965,33) (Chapman & Mackay, 1949) mesure la quantité de peroxyde d'hydrogène produite lorsque les acides gras de l'huile se détériorent à cause de la lumière, de la chaleur et de l'oxygène. Les huiles et le gras des aliments expérimentaux des essais avaient un indice de peroxydation moyen de moins de 15 mEq O₂·kg⁻¹, ce qui signifie que leur qualité a été maintenue durant toute la durée de l'expérience (un seuil de 25-50 mEq O₂·kg⁻¹ est caractéristique des huiles oxydées) (Hoffman, 1962). De plus, les compositions en acides gras des huiles individuelles, du mélange témoin ainsi que celles des aliments expérimentaux ont été mesurées avant le début de chacune des phases alimentaires. Les mêmes procédures décrites précédemment ont été mises en place lors des différentes dates de fabrication.

Des échantillons d'aliments moulus ont été prélevés à la meunerie immédiatement après leur fabrication, soit à des intervalles réguliers durant la vidange du mélangeur qui s'effectuaient en 150 secondes. Les échantillons ont été prélevés avant et après la mise en comprimés et immédiatement acheminés dans un laboratoire pour vérifier la conformité avec la formulation. Les concentrations nutritives (matière sèche, protéine brute, énergie brute, matière grasse, cendres, NDF) devaient se rapprocher de la formulation visée, ce qui assurait que les teneurs en protéine et en énergie étaient similaires entre les traitements pour un stade de croissance donné. Des échantillons d'aliments en comprimés ont été prélevés une fois par semaine durant la période expérimentale, combinés après plusieurs échantillonnages et acheminés dans différents laboratoires aux fins d'analyses chimiques. Les teneurs en nutriments (matière sèche, protéine brute, matière grasse, NDF, cendres, calcium, phosphore, sodium, composition en acides gras) ont été mesurées sur les échantillons d'aliments composites (tableaux 1 à 4). La composition en acides gras de l'huile de menhaden utilisée dans cette étude, particulièrement les acides gras n-3 à longue chaîne (C20:5 n-3 et C22:6 n-3), est semblable à celle lors d'études antérieures (Bergeron *et al.*, 2007; Gingras *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009).

Un indice de peroxydation a été mesuré chaque semaine tout au long de l'expérimentation afin de contrôler la qualité du gras dans les aliments expérimentaux entreposés dans des silos. Les aliments étaient sous forme de comprimés. L'indice de peroxydation a été déterminé à la suite d'une extraction totale du gras contenu dans les aliments à partir d'une méthode officielle d'extraction à l'éther (ref. Tecator, 1983.06.13 AN 67/83). Parallèlement, les températures dans les silos ont été enregistrées pour chacun des aliments entreposés. Pour ce faire, des thermocouples ont été installés à quatre endroits différents (à la base, au milieu, en haut et sur la paroi) dans chacun des silos afin de mesurer les températures en continu. Les données étaient enregistrées automatiquement toutes les 30 minutes et transférées dans un système relié à un ordinateur. Les observations faites sur les variations de température dans les silos et de la qualité des matières grasses des aliments expérimentaux entreposés dans les silos sont présentées à la section « Expérience 3 » de ce rapport.

Tableau 1: Composition des aliments expérimentaux (tels que servis)

	DÉBUT (30 A 55 KG)			CROISSANCE (55 A 85 KG)			FINITION (85 A 115 KG) ¹
	Traitement			Traitement			Traitement
Ingrédient (kg/t)	0 %	3 %	4 %	0 %	3 %	4 %	0 %
Maïs	498,45	498,45	488,17	439,48	439,48	393,03	619,45
Tourteau de soya	277,52	277,52	277,08	225,00	225,00	220,67	191,00
Blé	150,00	150,00	150,00	200,00	200,00	200,00	150,00
Gru	-	-	-	58,73	58,73	100,00	-
Mélange d'huiles végétales (noix de coco, palme et olive) ¹	30,00	-	-	30,00	-	-	-
Huile de menhaden	-	30,00	40,00	-	30,00	40,00	-
L-Lysine HCL	2,49	2,49	2,78	2,71	2,71	2,75	2,60
DL-Méthionine	0,62	0,62	0,76	0,42	0,42	0,45	0,30
L-Thréonine	0,61	0,61	0,85	0,63	0,63	0,69	0,60
L-Tryptophane	0,08	0,08	0,09	0,04	0,04	0,03	-
Pierre à chaux	10,01	10,01	10,01	10,58	10,58	10,98	9,50
Phosphate monocalcique	11,76	11,76	11,80	13,92	13,92	12,92	8,10
Sel	5,01	5,01	5,01	5,04	5,04	5,03	5,00
Prémélange de vitamines et de minéraux mineurs	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Chlorure de choline	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Antimoissure ²	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Composition chimique (telle que servie) ⁴							
Agent liant ³	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Matière sèche (%)	87,12	87,54	87,53	87,45	87,52	87,86	87,00
Protéine brute (%)	19,27	18,98	18,74	17,59	17,54	17,29	15,92

	DÉBUT (30 A 55 KG)			CROISSANCE (55 A 85 KG)			FINITION (85 A 115 KG) ¹
	Traitement			Traitement			Traitement
	0 %	3 %	4 %	0 %	3 %	4 %	0 %
Matière grasse (%)	5,31	3,62	4,92	5,07	4,73	5,21	2,69
NDF (%)	8,03	8,01	7,00	8,81	9,01	9,51	7,53
Cendres (%)	5,16	5,30	5,22	5,40	5,32	5,44	4,52
Calcium (%)	0,75	0,70	0,72	0,81	0,88	0,85	0,64
Phosphore total (%)	0,57	0,57	0,57	0,63	0,63	0,63	0,48
Sodium (%)	0,21	0,21	0,18	0,19	0,20	0,20	0,27
Énergie brute (EB ; kcal/kg)	3 997	3971	4 055	3 968	3 963	4 008	3 826
Énergie digestible calculée (ED; kcal/kg) ⁵	3 671	3 681	3 688	3 677	3 678	3 692	3 657
Granulométrie (µm)	617,63	617,63	612,01	636,61	636,61	605,14	636,45
Durabilité du comprimé (%)	85,80	84,60	77,80	91,30	89,80	86,50	92,90
Composition chimique théorique ⁶							
Matière sèche (%)	88,39	88,38	88,50	88,43	88,43	88,55	88,02
Protéine brute (%)	19,95	19,95	19,89	18,56	18,56	18,60	16,92
Matière grasse (%)	5,51	5,51	6,47	5,50	5,50	6,47	2,83
Énergie nette (EN; kcal/kg)	2470	2470	2515	2440	2440	2440	2406
Lysine digestible (%)	1,08	1,08	1,10	0,99	0,99	0,99	0,88
Méthionine digestible (%)	0,34	0,34	0,35	0,30	0,30	0,30	0,27
Méth+Cystine digestible(%)	0,65	0,65	0,66	0,60	0,60	0,60	0,56
Thréonine digestible (%)	0,70	0,70	0,72	0,64	0,64	0,64	0,59
Tryptophane digestible (%)	0,21	0,21	0,21	0,19	0,19	0,19	0,16
Ratio lysine dig. / EN	4,37	4,37	4,37	4,06	4,06	4,06	3,67
Calcium (%)	0,80	0,80	0,80	0,85	0,85	0,85	0,69
Phosphore total (%)	0,61	0,61	0,61	0,68	0,68	0,68	0,52
Sodium (%)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

¹ Mélange d'huile témoin : 33,3% d'huile de noix de coco, 37,0% d'huile de palme et 29,7% d'huile d'olive

² Myco CURB® (Agri-Marketing Corp., Mont St-Hilaire, Québec)

³ Maxi-Bond® (DCL, St-Hyacinthe, Québec)

⁴ Valeurs obtenues à la suite des analyses de laboratoire effectuées à partir d'échantillons composites tels que décrit dans la section fabrication des aliments expérimentaux

⁵ Calculée à partir des différentes composantes de l'aliment mesurées chimiquement en laboratoire et de l'équation développée par Le goff et Noblet (2001)

⁶ Valeurs obtenues des tables des matières premières du CDPQ (2004)

Tableau 2: Vitamines et minéraux mineurs apportés par le prémélange

		Par kg d'aliments complets
Vitamine A	(U.I.)	10 000
Vitamine D ₃	(U.I.)	1 500
Vitamine E	(U.I.)	60
Ménadione	(mg)	2,2
Thiamine	(mg)	2,0
Riboflavine	(mg)	5,0
Niacine	(mg)	30
Acide pantothénique	(mg)	20
Acide folique	(mg)	1
Pyridoxine	(mg)	3,0
Biotine	(mg)	0,25
Vitamine B ₁₂	(mcg)	30
Choline (addition séparée)	(mg)	500
Manganèse	(mg)	40
Zinc	(mg)	100
Fer	(mg)	150
Cuivre	(mg)	25
Iode	(mg)	0,6
Sélénium	(mg)	0,3

Tableau 3. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des huiles expérimentales

Acide gras	Mélange d'huiles témoin	Huile de menhaden
14:0	6,4	8,2
16:0	24,0	18,0
16:1 n-7	0,4	10,8
18:0	3,7	3,5
18:1 n-12	0,0	2,3
18:1 n-9	41,0	8,9
18:1 n-7	1,1	3,4
18:2 n-6	7,2	1,8
18:3 n-3	0,28	1,2
18:4 n-3	0,0	3,4
20:0	0,32	0,26
20:1 n-9	0,16	1,4
20:1 n-12	0,0	0,16
20:1 n-9	0,16	1,4
20:2 n-6	0,0	0,30
20:4 n-6	0,0	1,9
20:4 n-3	0,0	1,5
20:5 n-3	0,0	17,2
24:1 n-9	0,0	0,37
22:4 n-6	0,0	0,20
22:5 n-6	0,0	0,18
22:5 n-3	0,0	2,6
22:6 n-3	0,0	11,2
Σ saturés	49,9	30,1
Σ mono-	42,8	28,7
Σ polyinsaturés	7,7	43,2
Σ n-3 totaux	0,55	38,4
Σ n-6 totaux	7,2	4,8
n-3 LC ¹	0,0	31,1
n-3 / n-6	0,08	8,0
n-6 / n-3	13,0	0,13

¹ Somme des acides gras n-3 à longue chaîne

Tableau 4. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des aliments expérimentaux

Acide gras	DÉBUT (30 À 55 KG)			CROISSANCE (55 À 85 KG)			FINITION (85 À 115 KG)
	Traitement			Traitement			Traitement
	0 %	3 %	4 %	0 %	3 %	4 %	0 %
14:0	4,4	4,2	4,5	3,6	4,6	4,9	0,0
16:0	21,7	15,2	15,5	19,4	15,9	16,2	13,1
16:1 n-7	0,3	5,2	6,3	0,28	6,4	6,2	0,0
18:0	3,5	2,8	2,9	3,0	2,8	2,9	2,1
18:1 n-12	0,0	1,1	1,2	0,0	1,3	1,3	0,0
18:1 n-9	37,8	16,8	15,5	32,2	15,1	14,3	23,5
18:1 n-7	1,0	2,1	2,2	1,0	2,3	2,4	0,89
18:2 n-6	29,1	29,5	26,5	29,8	28,6	25,9	56,3
18:3 n-3	1,6	1,9	2,0	1,8	2,2	2,3	2,9
18:4 n-3	0,0	1,6	1,9	0,0	2,0	1,9	0,0
20:0	0,37	0,33	0,33	0,22	0,32	0,31	0,39
20:1 n-9	0,23	0,75	1,0	0,26	1,1	0,94	0,32
20:1 n-12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,06	0,08	0,0
20:2 n-6	0,0	0,1	0,21	0,0	0,24	0,21	0,0
20:4 n-6	0,0	1,0	1,0	0,0	1,1	1,2	0,0
20:4 n-3	0,0	0,61	0,92	0,0	1,0	0,78	0,0
20:5 n-3	0,0	9,7	8,9	0,0	9,1	11,0	0,0
24:1 n-9	0,0	0,21	0,23	0,0	0,23	0,17	0,0
22:4 n-6	0,0	0,0	0,13	0,0	0,0	0,20	0,0
22:5 n-6	0,0	0,18	0,23	0,0	0,24	0,22	0,0
22:5 n-3	0,0	1,3	1,4	0,0	1,5	1,5	0,0
22:6 n-3	0,0	5,1	6,2	0,0	6,6	6,3	0,0
Σ saturés	40,3	22,9	23,4	34,8	23,9	24,5	16,2
Σ mono-insaturés	39,6	26,9	27,6	34,0	27,6	26,4	24,7
Σ polyinsaturés	32,2	53,2	51,7	33,3	55,1	54,1	59,2
Σ n-3 totaux	3,1	22,2	23,4	3,5	24,7	26,2	2,9
Σ n-6 totaux	29,1	31,0	28,3	29,8	30,4	27,9	56,3
n-3 LC ¹	0,0	16,2	16,5	0,0	17,2	18,8	0,0

	DÉBUT (30 À 55 KG)			CROISSANCE (55 À 85 KG)			FINITION (85 À 115 KG)
	Traitement			Traitement			Traitement
Acide gras	0 %	3 %	4 %	0 %	3 %	4 %	0 %
n-3 / n-6	0,11	0,72	0,83	0,12	0,81	0,94	0,05
n-6 / n-3	9,3	1,4	1,2	8,5	1,2	1,1	19,1

¹ Somme des acides gras n-3 à longue chaîne

Performances zootechniques et procédure d'abattage

Durant les périodes de début, de croissance et de finition, les quantités d'aliments servies ont été mesurées chaque jour. Les poids des animaux ont été mesurés toutes les deux semaines et les refus alimentaires à intervalles réguliers, afin d'établir les gains moyens quotidiens, les ingérés quotidiens et les taux de conversion alimentaire des porcs. Les manipulations alimentaires étaient les mêmes pour les salles #1 et #2. Lorsque l'aliment dans une trémie était souillé par des urines ou des fèces, l'aliment contaminé était retiré, pesé et une nouvelle quantité d'aliments frais était ajoutée à la trémie. La consommation alimentaire des porcs a été mesurée par parc alors que les poids étaient évalués individuellement. Toutefois, le poids moyen du parc a été calculé pour être en mesure de calculer le gain moyen quotidien et le taux de conversion alimentaire. Au moment de changer l'aliment entre les périodes de début, de croissance et de finition, les porcs ont été pesés ainsi que les refus. La consommation en eau a été évaluée tout au long de l'expérience à chaque jour et pour chacun des parcs de la salle #1. Tel que décrit précédemment dans la section condition d'élevage, des compteurs d'eau individuels ont permis l'enregistrement des données de consommation par parc. Les épaisseurs de gras et de longe ont été mesurées sur les 78 porcs de la salle #1 à 55, 85 et 100 kg de poids vif avec un appareil à ultrasons (UltraScan 50, Noveko, Montréal, Canada). Ces mesures ont été prises individuellement au niveau de la 3^e et de la 4^e avant-dernières côtes par l'équipe du CDPQ, spécialisée dans ce type de mesures. Les porcs ont été pesés le jour précédent, ou celui subséquent aux prises de mesures à ultrasons. Lorsque les porcs atteignaient le poids de marché de 115 kg, ils étaient acheminés à l'abattoir A.Trahan Transformation (Yamachiche, QC) après un jeûne minimal de 16 heures afin d'être abattus, pesés et classifiés. La procédure prévue au protocole pour les envois à l'abattoir prévoyait l'abattage simultané des deux porcs d'un même parc (unité expérimentale) lorsque le poids de ce dernier oscillait autour de 230 kg. Les abattages se sont échelonnés sur quatre semaines, quatre envois ont été effectués. À chaque envoi, une proportion égale d'animaux de chaque traitement était représentée. La classification des carcasses a été effectuée à chaud selon les normes du système de classification canadien. Après l'échouage et l'éviscération, les carcasses ont été pesées et les épaisseurs de gras et de muscle ont été mesurées avant le refroidissement de ces dernières. C'est avec une sonde invasive Destron au niveau du côté gauche de la carcasse et entre la 3^e et la 4^e avant-dernières côtes que ces mesures ont été effectuées. Les épaisseurs de gras et de muscle servent à déterminer le rendement en viande maigre des carcasses à partir d'une équation standard de régression du système de classification. Finalement, l'indice de classement a été déterminé à partir du poids chaud de la carcasse et du rendement en viande maigre. Les données relatives à chacune des carcasses ont été récupérées par l'entremise de l'encan électronique (poids chaud de la carcasse, épaisseurs de gras et de muscle mesurées au site de classification avec une sonde invasive Destron, rendement en viande maigre, indice de classement, prix). Un tatouage unique à chacun des porcs a été effectué au moment de l'abattage, ce qui a permis de retracer les données individuelles de chacune des carcasses.

Biopsies musculaires et prélèvements sanguins

Des biopsies ont été réalisées à différents intervalles durant l'expérience à 55, 85 et 100 kg afin de mesurer la composition en acides gras des membranes musculaires (phospholipides) et du gras intramusculaire (triglycérides). Les biopsies de la longe ont été effectuées sur les 15 porcs spécifiquement élevés dans la salle #2 pour cette fin. La pratique des biopsies à 100 kg avait pour but de vérifier l'appauvrissement des fractions des lipidiques du muscle en acides gras n-3 à longue chaîne, 15 jours après le retrait de l'huile de menhaden des aliments. Par la même occasion, un échantillon de gras dorsal a été prélevé lors de la biopsie à 100 kg afin de mesurer la composition en acides gras de ce tissu.

Biopsies musculaires. Avant de pratiquer la biopsie musculaire, les porcs subissaient un jeûne d'environ 2,5 heures. Vingt minutes avant la biopsie, les porcs ont reçu une sédation à raison de 2 mg d'azapérone/kg poids par voie intramusculaire (40 mg/ml solution stérile; Stresnil, Merial Canada, Baie-d'Urfé). Après ce laps de temps, la procédure de biopsie a été initiée par une anesthésie générale en injectant par voie intraveineuse une solution de thiopental de sodium selon un taux respectif variant entre 8 et 9 mg/kg de poids (Thiotal 2,5 % ou 5 % selon le poids des porcs, Vétoquinol, Lavaltrie). Une fois l'animal anesthésié, une biopsie musculaire de la longe (*longissimus dorsi*) a été effectuée. Le site de biopsie était dans la région de la fin des vertèbres thoraciques et du début des vertèbres lombaires. L'échantillon de muscle prélevé ne contenait pas de gras visible. Il a été pesé (750-800 mg), subdivisé en trois parties et placé dans trois récipients qui ont ensuite été congelés dans l'azote liquide (procédure réalisée en moins de cinq minutes). Quant aux biopsies pratiquées à 100 kg, un échantillon de gras dorsal (225 mg) a été prélevé simultanément tout en s'assurant que les trois couches de gras sous-cutané soient prélevées. Les échantillons de gras ont été subdivisés en deux parties et immédiatement congelés dans l'azote liquide. Tous les échantillons (muscle et gras) ont été conservés à -80 °C jusqu'à ce que les analyses des phospholipides membranaires et du profil en acides gras des triglycérides (ou lipides neutres) soient réalisées. Les sédatifs qui ont été utilisés lors des biopsies ont été spécifiquement sélectionnés afin de minimiser les symptômes d'hyperglycémie et pour empêcher toute modification de l'utilisation corporelle des nutriments (Adams, 2001).

Prélèvements sanguins. Les 78 porcs de la salle #1 ont été soumis à des prélèvements sanguins répétés sur deux jours lors de la dernière semaine des périodes de début (55 kg) et de croissance (85 kg). Au préalable, tous les animaux ont été mis à jeun durant la nuit, les prélèvements ont été effectués dans un intervalle de 2 à 3 heures en matinée de sorte que la durée totale du jeûne ne dépassait pas 18 heures. Trente-six à quarante heures ont séparé les deux jours de prélèvements pour chacun des stades de croissance. Après le prélèvement, le sang hépariné (1 X 10 ml) était immédiatement placé dans la glace. Quant au sang échantillonné pour le sérum (1 x 10 ml), il était laissé à la température de la pièce pendant 20-30 minutes afin d'assurer une coagulation adéquate. Après ce délai, ces tubes étaient placés aussitôt sur de la glace. Tous les échantillons de sang ont été centrifugés à 4 000 RPM pendant 15 minutes à 4 °C immédiatement après le prélèvement ou le temps de coagulation. Les échantillons ont été congelés à -80 °C pour analyses ultérieures. Le sang hépariné a été utilisé pour mesurer les concentrations de l'insuline et des acides aminés plasmatiques alors que le sérum a été utilisé pour mesurer les concentrations sériques en glucose et en urée. Ces paramètres ont été évalués afin de servir d'indicateurs de la sensibilité corporelle à l'insuline en réponse à des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden.

Analyses de laboratoire

Les échantillons de plasma et de sérum provenant des deux porcs du même parc ont été combinés sur une base volumétrique. Cependant, les échantillons composites n'ont pas été formés lorsque l'on pouvait percevoir trop d'hémolyse (bri des globules rouges qui donnent une couleur rougeâtre à l'échantillon). Si l'hémolyse était plus que modérée, les échantillons étaient analysés séparément. Les échantillons, très hémolysés, ont été éliminés puisque le contenu des globules rouges biaise la plupart des analyses.

Ainsi, les échantillons composites de chaque parc pour les deux jours de prélèvement et chacune des périodes de croissance (30-55 kg et 55-85 kg) ont été analysés en laboratoire. La concentration en insuline plasmatique a été mesurée par radioimmunoassay (Linco, St-Louis, MO) tel que déjà décrit antérieurement (*Bergeron et al., 2007*). Les acides aminés plasmatiques ont été analysés à la suite d'une dérivation pré-colonne Pico-Tag et analysés par chromatographie liquide à haute performance (HPLC) telle que décrite antérieurement (*Thivierge et al., 2005*). Quant aux concentrations sériques de glucose et d'urée, les analyses ont été effectuées à partir de trousse colorimétriques selon les méthodes standards employées au Centre de recherche du CHUL.

Les compositions en acides gras des huiles, des aliments et du gras dorsal ont été mesurées à la suite d'une séparation et d'une hydrolyse des lipides, suivie par une estérification produisant des acides gras méthylesters (*Counil et al., 2009*). Les analyses de chromatographie en phase gazeuse capillaire ont été réalisées par l'emploi d'une colonne HP-88 (100m x 0,25mm de diamètre interne x 0,20µm d'épaisseur; Agilent Technologies, Oakville, Ontario) et d'un appareil de chromatographie Hewlett-Packard 5890 GC (Hewlett Packard, Toronto, Ontario, Canada) couplé avec un détecteur à ionisation à flamme (*Counil et al., 2009*). Les acides gras sont exprimés en milligrammes d'acides gras par 100 grammes de tissu frais ou en pourcentage des acides gras totaux basé sur la surface des pics des chromatographies.

Mortalité et traitements médicaux appliqués

Les porcs utilisés pour cet essai étaient exempts du syndrome reproducteur et respiratoire porcin (SRRP), du Mycoplasme (*Mycoplasma hyopneumoniae*) et de la pleuropneumonie porcine (sérotypes 1 et 5). En période de pouponnière, l'aliment offert de 8 jusqu'à 12 kg de poids a été fortifié avec du chlorhydrate de chlortétracycline (Chlor100, Bio Agri Mix Ltée, Mitchell, Ontario) à raison de 660 ppm afin de prévenir les infections diverses. De plus, un traitement antibiotique préventif a été appliqué dans l'eau (pénicilline -V potassium), deux à trois jours après l'entrée des porcelets au bâtiment, à raison de 333 mg/litre eau dans le but de prévenir les infections secondaires. Un vaccin contre le circovirus de type 2 (Ingelvac® CircoFLEX™, Boehringer Ingelheim Ltée, Burlington, Ontario) a été appliqué vers 11 et 20 kg de poids pour réduire le risque que les porcs contractent le syndrome de dépérissement postsevrage (SDPS).

Outre l'application de ces traitements, aucune médication de groupe n'a été appliquée durant l'expérimentation, que ce soit à titre curatif ou comme facteur de croissance. Seuls les porcs qui présentaient des signes cliniques de maladie ont été traités avec des médicaments injectables. Lorsqu'un animal nécessitait un traitement médicamenteux sur une période prolongée, il était retiré de l'étude. Des problèmes locomoteurs sont apparus durant l'expérience chez 6 porcs parmi 93 animaux (6,5 %), ce qui a nécessité des traitements médicamenteux individuels. Soixante-sept pour cent (4/6) des porcs traités durant l'expérimentation souffraient de problèmes de locomotion (maux de pattes, arthrite, boiteries, pattes enflées) alors que les autres présentaient des prolapsus rectaux. Un nombre égal de porcs par traitement a été traité durant l'expérimentation. Deux porcs ont été retirés en cours d'essai. Dans un cas, ce sont des problèmes locomoteurs et un prolapsus rectal qui ont entraîné son élimination alors que des maux de pattes extrêmes ont engendré le retrait de l'autre porc. Un faible taux de mortalité (1,1 %) a été enregistré durant la phase animale. Pour des raisons inconnues, un porc est mort immédiatement après que la biopsie ait été pratiquée à 100 kg de poids.

Analyses statistiques

Le dispositif statistique et l'attribution des traitements ont été planifiés selon un bloc complet. En raison de l'effet « bloc » non significatif, ce dernier a été remis dans le terme d'erreur et les analyses statistiques ont été conduites selon un dispositif complètement aléatoire.

Paramètres étudiés durant les périodes 30 à 55 kg et 55 à 85 kg. Les observations sur les effets des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden sur les variables dépendantes ont été soumises à une analyse de la variance. Le dispositif statistique consistait en un dispositif complètement aléatoire. Ce dernier testait trois apports alimentaires croissants d'huile de menhaden assignés à 39 unités expérimentales (78 porcs, 39 parcs; 2 porcs/parc) avec des mesures répétées conduites pour comparer deux périodes de croissance (début 30-55 kg et croissance 55-85 kg). Ce dispositif a permis de tester les effets des traitements alimentaires lors des stades de croissance et leur interaction sur les performances, des paramètres sanguins et des mesures à ultrasons. Les procédures mixtes de SAS (SAS, 2000) ont été utilisées et incluaient une covariable définie comme étant le poids initial juste avant le début de l'expérience. Le modèle statistique incluait les traitements, la covariable et les périodes expérimentales comme effets fixes et le paramètre parc (traitement) comme effet aléatoire. Les degrés de liberté du modèle peuvent être décomposés de la façon suivante [total de 77 d.l.: traitement 2 d.l.; terme d'erreur en parcelle principale définit comme parc (traitement) avec 36 d.l., covariable 1 d.l.; période 1 d.l.; traitement*période 2 d.l.; terme d'erreur en sous-parcelle: 35 d.l.]. Les observations des paramètres sanguins et la composition en acides gras des lipides musculaires et du gras dorsal pour les périodes de 30-55 kg et de 55-85 kg ont été soumises à ces mêmes procédures mixtes, mais excluaient l'utilisation d'une covariable. Le modèle statistique incluait alors les effets des traitements et les périodes comme effets fixes et le paramètre parc (traitement) comme effet aléatoire. Les degrés de liberté peuvent être décomposés de la façon suivante pour les paramètres sanguins étudiés sur 39 parcs au total: [total de 77 d.l.: traitement 2 d.l.; parc(traitement) 36 d.l., période 1 d.l.; traitement*période 2 d.l.; terme d'erreur en sous-parcelle: 36 d.l.]. Exceptionnellement, l'investigation des effets des traitements sur la composition en acides gras des lipides du muscle a impliqué l'utilisation de 15 parcs (1 porc/parc). Ainsi, les degrés de liberté peuvent être décomposés de la façon suivante [total de 29 d.l.: traitement 2 d.l.; parc(traitement) 12 d.l.; période 1 d.l.; traitement*période 2 d.l.; terme d'erreur en sous-parcelle: 12 d.l.].

Paramètres étudiés durant la période témoin de finition entre 85 et 115 kg. Durant cette période, les 78 porcs étaient alimentés avec une ration de finition témoin. Les effets du préconditionnement des lipides corporels avec l'huile de menhaden lors des périodes de 30-55 kg et de 55-85 kg ont été testés en utilisant un dispositif complètement aléatoire qui incluait une covariable. Cette dernière a été définie comme étant le poids corporel au début de cet essai, soit à 85 kg. Cette approche statistique a été choisie pour spécifiquement tester l'effet moyen de l'alimentation des périodes précédentes de début et de croissance sur les performances des porcs en finition. Les procédures GLM de SAS ont été utilisées (SAS, 2000). Les degrés de liberté du modèle associés à l'évaluation des effets des différents paramètres du modèle peuvent être décomposés de la façon suivante [total de 38 d.f.: traitement 2 d.f.; covariable 1 d.f.; traitement*covariable 2 d.f.; terme d'erreur: 33 d.f.]. Comme détaillée plus haut, exceptionnellement, l'étude de l'effet du préconditionnement sur les lipides du muscle a utilisé 15 parcs (1 porc/parc) – ainsi, les degrés de liberté peuvent être décomposés de la façon suivante [total de 14 d.l.: traitement 2 d.l.; covariable 1 d.l.; traitement *covariable 2 d.l.; terme d'erreur: 9 d.l.]. Les données d'abattage ont été examinées en utilisant un modèle similaire, mais excluaient l'utilisation d'une covariable puisque l'effet moyen des traitements sur les paramètres de carcasses est consécutif à l'effet général de tout l'engraissement. Les degrés de liberté du modèle peuvent être décomposés de la façon suivante [total de 14 d.l.: traitement 2 d.l.; terme d'erreur: 12 d.l.].

La comparaison de l'effet des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden s'est faite en utilisant des contrastes polynomiaux où des effets linéaire et quadratique ont été testés. Les fonctions ORPOL des procédures IML de SAS ont été utilisées pour générer les coefficients des contrastes polynomiaux ayant des intervalles inégaux. Les modèles de régressions linéaires et non linéaires ont été faits en utilisant les procédures de régressions linéaires et non linéaires de SAS (SAS, 2000). La somme des carrés de type III a été interprétée. Les moyennes des moindres carrés sont présentées dans les tableaux de données accompagnées de l'erreur type. $P \leq 0,05$ est considéré significatif et $0,05 < P \leq 0,10$ est considéré comme une tendance.

RÉSULTATS

Expérience 1

Composition en acides gras des lipides du muscle. Les apports en continu de 0, 3 et 4 % d'huile de menhaden aux régimes des porcs durant les deux premières périodes de croissance ont modifié largement la composition en acides gras des fractions lipidiques du muscle (tableau 5). Les phospholipides membranaires totaux ont été fortement modifiés lors des deux périodes de 30 à 55 kg et de 55 à 85 kg de poids vif et les changements survenaient principalement dans la fraction des acides gras n-3. Les acides gras n-3 à longue chaîne des phospholipides totaux des muscles ont augmenté de façon quadratique ($P=0,0004$) à 55 kg. Comparativement au témoin, cet accroissement est de +517 % avec 3 % d'huile de menhaden et de +552 % avec 4 % d'huile de menhaden (Tableau 5). À 85 kg de poids vif, cet enrichissement des membranes des muscles avait progressé, soit de +732 % et +837 % ($P=0,001$; effet quadratique) avec 3 et 4 % d'huile de menhaden, respectivement. Ces changements dans la fraction des n-3 à longue chaîne étaient principalement attribuables à l'augmentation de la teneur en acides gras C20:5 n-3, C22:5 n-3 et C22:6 n-3. La teneur en C20:5 n-3 démontre la plus forte hausse ($P=0,0003$; effet quadratique). Les teneurs dans les membranes musculaires de cet acide gras étaient de 0,5, 7,6 et 8,0 % des acides gras totaux lorsque des apports croissants d'huile de menhaden étaient offerts durant la période de 30 à 55 kg. La teneur du C20:5 n-3 dans les membranes musculaires a progressé davantage de façon quadratique ($P=0,007$) de 0,3, 8,8 jusqu'à 10,4 % des acides gras totaux lorsque les porcs recevaient 0, 3 et 4 % d'huile de menhaden durant la période de 55-85 kg. Une réponse similaire, mais de moindre amplitude a été observée pour le C22:5 n-3 alors que sa teneur a augmenté quadratiquement lors des périodes de 55 kg ($P=0,001$) et de 85 kg ($P=0,004$). Le C22:6 n-3 se comporte différemment du C20:5 n-3 puisque sa teneur dans les phospholipides membranaires a augmenté, mais selon une plus faible amplitude. Chez les porcs de 55 kg, la concentration de C22:6 n-3 s'est accrue linéairement ($P<0,0001$) de 0,6, 3,6 jusqu'à 4,0 % des acides gras totaux avec des apports croissants d'huile de menhaden alors qu'à 85 kg, les teneurs augmentent quadratiquement ($P=0,004$) de 0,47, 4,1 jusqu'à 4,5 %, respectivement. La concentration du C18:3 n-3, un acide gras n-3 à courtes chaînes qui représente une faible proportion des acides gras n-3 dans les membranes musculaires des porcs de la présente étude, n'est pas modifiée par les apports d'huile de menhaden ni par l'âge des animaux. Sa teneur moyenne est de 0,46 % des acides gras totaux.

Pendant que les phospholipides membranaires de la longe s'enrichissaient en acides gras n-3 à longue chaîne lors de la période de 30-55 kg, parallèlement ils s'appauvrirent linéairement en acides gras n-6 totaux ($P<0,0001$). Relativement au témoin, cette baisse était de -16 et 22 % avec des régimes contenant 3 et 4 % d'huile de menhaden, respectivement. Cet appauvrissement linéaire s'était poursuivi à 85 kg ($P<0,0001$) par l'apport croissant d'huile de menhaden avec des réductions de la teneur en n-6 totaux de -22 et -25 % par rapport au groupe témoin. Ces changements de la concentration des acides gras n-6 totaux sont attribuables principalement à la teneur en C18:2 n-6 qui a été linéairement réduite à 55 kg ($P=0,0001$) de -10 et -15 % par rapport au témoin pour des apports respectifs de 3 et 4% d'huile de menhaden. Le C18:2 n-6 représente en moyenne 30% des acides gras totaux dans le cas du groupe témoin. La réduction de la teneur en C18:2 n-6 a davantage progressé linéairement lorsque les porcs pesaient 85 kg ($P<0,0001$) avec des diminutions de -15 et -17 % de leur teneur relativement au témoin. Une réponse similaire a été observée pour l'acide gras C20:4 n-6 qui représente une plus faible fraction des acides gras n-6 totaux (en moyenne 7 % des acides gras totaux). Les changements dans les teneurs en acides gras n-3 et n-6 totaux ont engendré une diminution du ratio n-6/n-3 lorsque les apports d'huile de menhaden passent de 0 à 4 %. À 55 kg, le ratio a diminué linéairement ($P= 0,0009$) de 15,0 jusqu'à 2,2 et de 22,9

jusqu'à 2,5 lorsque les porcs pesaient 85 kg ($P<0,0001$) (tableau 5). L'amplitude de cette réponse aux traitements alimentaires n'était toutefois pas la même selon la période de croissance des animaux (interaction $P<0,001$). Quant à la somme des acides gras totaux polyinsaturés, elle est augmentée de +7 et +12 % avec des apports de 4 % d'huile de menhaden pour les porcs de 55 kg ($P<0,04$, effet quadratique) et 85 kg ($P<0,0005$, effet linéaire), respectivement en comparaison au traitement témoin. La consommation croissante d'huile de menhaden a entraîné une diminution des acides gras totaux mono-insaturés sans que l'effet soit altéré par la période de croissance. La réduction des concentrations des acides gras mono-insaturés s'explique surtout par une diminution quadratique du C18:1 n-9 ($P<0,004$). Peu importe le traitement alimentaire, les acides gras totaux saturés (C14:0, C16:0, C18:0) mesurés dans les membranes du muscle de la longe sont demeurés inchangés. Ainsi, leur teneur moyenne est de 36 % des acides gras totaux, peu importe le traitement et la période. Les acides gras saturés individuels ont répondu de façon similaire à leur somme.

Tableau 5. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des phospholipides membranaires de la longe chez les porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg¹

Acides gras	Période (kg)	Traitement			Erreur type	Effet des traitements	
		0 %	3 %	4 %		Lin	Quad
C14:0	55	0,22	0,19	0,25	0,07	0,85	0,58
	85	0,17	0,26	0,23	0,07	0,44	0,64
C16:0	55	19,5	20,2	20,9	0,8	0,22	0,69
	85	20,0	21,2	20,7	0,8	0,40	0,47
C16:1 n-7	55	0,77	1,1	1,4	0,1	0,004	0,57
	85	1,2	1,2	1,3	0,1	0,50	0,66
C18:0	55	14,1	14,6	14,7	0,4	0,18	0,89
	85	14,1	14,4	14,7	0,3	0,26	0,69
C18:1 n-9	55	15,9	8,9	9,5	0,5	<,0001	0,004
	85	16,2	9,2	8,5	0,5	<,0001	0,05
C18:1 n-7	55	2,3	2,8	3,1	0,1	<,0001	0,22
	85	2,2	2,8	3,0	0,1	<,0001	0,71
C18:2 n-6	55	30,2	27,3	25,8	0,6	,0001	0,61
	85	30,0	25,5	24,9	0,5	<,0001	0,36
C18:3 n-3	55	0,62	0,46	0,45	0,13	0,30	0,86
	85	0,31	0,54	0,40	0,12	0,45	0,33
C20:3 n-6	55	0,91	1,1	1,0	0,2	0,57	0,65
	85	1,0	0,92	1,1	0,2	0,96	0,55
C20:4 n-6	55	9,8	7,1	6,0	0,3	<,0001	0,61
	85	9,7	6,2	5,5	0,3	<,0001	0,35
C20:5 n-3	55	0,49	7,6	8,0	0,2	<,0001***	,0003
	85	0,28	8,8	10,4	0,2	<,0001	0,007
C22:4 n-6	55	1,4	0,28	0,24	0,07	<,0001	0,02

Acides gras	Période	Traitement			Erreur type	Effet des traitements	
		(kg)	0 %	3 %		4 %	Lin
	85	1,4	0,20	0,17	0,07	<,0001	0,008
C22:5 n-3	55	1,2	3,0	2,9	0,1	<,0001	0,001
	85	1,1	3,0	3,0	0,1	<,0001	0,004
C22:6 n-3	55	0,60	3,6	4,0	0,2	<,0001**	0,06*
	85	0,47	4,1	4,5	0,2	<,0001	0,004
C24:1 n-9	55	0,36	0,26	0,34	0,10	0,68	0,52
	85	0,29	0,30	0,33	0,09	0,77	0,88
∑ saturés	55	34,4	35,7	36,5	0,8	0,08	0,78
	85	35,0	36,4	36,2	0,7	0,22	0,57
∑ polyinsaturés	55	45,8	50,9	48,9	0,9	0,006	0,04
	85	44,8	49,6	50,2	0,9	,0005	0,51
∑ mono-insaturés	55	20,2	11,4	15,9	1,2	0,004	0,004
	85	21,3	14,9	14,6	1,2	0,001	0,38
∑ n-3 totaux	55	2,9	14,7	15,4	0,4	<,0001***	0,001
	85	2,2	16,4	18,2	0,4	<,0001	0,002
∑ n-3 LC	55	2,3	14,2	15,0	0,4	<,0001***	,0004
	85	1,9	15,8	17,8	0,4	<,0001	0,001
∑ n-6 totaux	55	42,9	36,2	33,5	0,7	<,0001	0,66
	85	42,6	33,2	32,0	0,6	<,0001	0,09
n-3/n-6	55	0,07	0,40	0,46	0,01	<,0001***	0,006***
	85	0,05	0,50	0,57	0,009	<,0001	,0005
n-6/n-3	55	15,0	2,5	2,2	2,5	,0009*	0,36
	85	22,9	2,0	2,5	2,3	<,0001	0,11

¹Moyenne des moindres carrés, n=5

*Interaction traitement x périodes (linéaire ou quadratique) significatives, * signifie P < 0,05; ** signifie P < 0,01; *** signifie P < 0,001.

Les triglycérides intramusculaires sont des lipides non polaires qui ont une composition différente des phospholipides polaires (tableau 6). Ils sont en grande partie saturés (40 % du total) et contiennent des acides gras mono-insaturés (50 % du total) qui demeurent inchangés avec les apports alimentaires d'huile de menhaden. Contrairement aux phospholipides membranaires, les acides gras polyinsaturés représentaient seulement 10 % en moyenne des acides gras totaux des triglycérides intramusculaires. L'ajout d'huile de menhaden au régime des porcs a peu d'effet sur cette fraction lipidique. Cette dernière contient principalement des acides gras n-6, le contenu moyen est de 8 % des acides gras totaux. Contrairement aux phospholipides, l'huile de menhaden n'a pas modifié la teneur en acides gras n-6 des triglycérides intramusculaires. La hausse ($P < 0,01$, valeur P inclusive pour les 2 périodes) en acides gras polyinsaturés des triglycérides par l'apport d'huile de menhaden est attribuable à l'augmentation ($P < 0,0001$) des acides gras n-3 totaux (contenu moyen de 2,1 % des acides

gras totaux). Contrairement aux phospholipides membranaires, le contenu en acides gras n-3 à longue chaîne des triglycérides représente une fraction mineure des acides gras polyinsaturés. Peu importe la période de croissance, la teneur en ces acides gras est augmentée linéairement ($P < 0,0001$) lorsqu'on applique 0, 3 et 4 % d'huile de menhaden. Les teneurs moyennes sont de 0,05, 1,9 et 2,8 % des acides gras totaux pour ces trois traitements, respectivement.

Tableau 6. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des triglycérides intramusculaires de la longe chez des porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg¹

	Période (kg)	Traitement			Erreur type	Effet des traitements	
		0 %	3 %	4%		Lin	Quad
C14:0	55	1,4	1,4	1,2	0,3	0,56	0,51
	85	1,7	1,5	1,1	0,3	0,12	0,48
C16:0	55	25,8	25,0	24,8	0,5	0,13	0,89
	85	26,2	24,7	24,3	0,5	0,01	0,93
C16:1 n-7	55	2,6	3,0	2,6	0,5	0,77	0,76
	85	3,4	3,2	3,5	0,4	0,87	0,90
C18:0	55	12,5	13,4	13,0	0,5	0,27	0,36
	85	13,1	13,8	13,1	0,4	0,77	0,22
C18:1 n-9	55	43,9	40,8	40,6	1,0	0,02	0,65
	85	43,7	42,1	41,1	0,9	0,06	0,72
C18:1 n-7	55	3,8	4,1	4,0	0,2	0,27	0,69
	85	3,7	4,0	4,1	0,2	0,17	0,93
C18:2 n-6	55	7,7	8,4	8,6	0,6	0,25	0,98
	85	6,4	6,5	7,1	0,5	0,46	0,58
C18:3 n-3	55	0,44	0,67	0,60	0,11	0,18	0,44
	85	0,26	0,51	0,62	0,10	0,02	0,88
C20:3 n-6	55	0,07	0,03	0,04	0,03	0,39	0,60
	85	0,04	0,02	0,04	0,02	0,75	0,63
C20:3 n-3	55	0,02	0,02	0,05	0,03	0,63	0,58
	85	0,05	0,02	0,04	0,02	0,69	0,46
C20:4 n-6	55	0,23	0,13	0,25	0,06	0,81	0,17
	85	0,11	0,18	0,24	0,06	0,16	0,71
C20:5 n-3	55	0,00	0,58	0,95	0,07	< ,0001	0,18
	85	0,00	0,56	0,98	0,07	< ,0001	0,06
C22:4 n-6	55	0,04	0,00	0,00	0,02	0,04	0,60
	85	0,05	0,00	0,01	0,01	0,06	0,29
C22:5 n-3	55	0,00	0,61	0,71	0,10	< ,0001	0,49
	85	0,04	0,64	0,92	0,09	< ,0001	0,60
C22:6 n-3	55	0,00	0,57	0,97	0,06	< ,0001	0,07
	85	0,00	0,62	0,95	0,06	< ,0001	0,27

	Période	Traitement			Erreur type	Effet des traitements	
	(kg)	0 %	3 %	4%		Lin	Quad
Σ saturés	55	40,1	40,0	39,3	0,8	0,55	0,59
	85	41,3	40,4	38,9	0,8	0,06	0,38
Σ polyinsaturés	55	8,9	11,3	12,5	0,9	0,007	0,77
	85	7,2	9,4	11,2	0,8	0,004	0,42
Σ monoinsaturés	55	50,8	48,8	47,8	1,1	0,06	0,88
	85	51,4	49,9	49,2	1,1	0,16	0,90
Σ n-3 totaux	55	0,47	2,4	3,3	0,3	< ,0001	0,70
	85	0,35	2,4	3,5	0,2	< ,0001	0,27
Σ n-3 LC	55	0,02	1,8	2,7	0,2	< ,0001	0,35
	85	0,08	1,9	2,9	0,2	< ,0001	0,16
Σ n-6 totaux	55	8,4	8,8	9,2	0,6	0,35	0,84
	85	6,8	7,0	7,7	0,6	0,36	0,53
n-3/n-6	55	0,05	0,28	0,36	0,02	< ,0001**	0,94
	85	0,05	0,34	0,45	0,02	< ,0001	0,52

¹Moyenne des moindres carrés, n=5.

*Interaction traitement x périodes (linéaire ou quadratique) significatives, ** signifie P < 0,01.

Sommes quantitatives des acides gras contenus dans les phospholipides et les triglycérides intramusculaires. L'évaluation quantitative des effets de traitements fournit de l'information additionnelle sur les mouvements des acides gras n-3 à longue chaîne, des n-6 totaux et des saturés entre les deux principales fractions lipidiques du muscle (tableau 7). L'incorporation différentielle des acides gras entre les phospholipides et les triglycérides intramusculaires lorsque ceux-ci sont exprimés en mg par 100 g de muscle frais est alors amplifiée. Ceci s'explique par une quantité croissante de triglycérides intramusculaires avec l'avancement de la maturité des porcs entre 50 et 85 kg pour des teneurs quantitatives en n-3 plus faibles dans les triglycérides que dans les phospholipides. En moyenne, la quantité des triglycérides intramusculaires totaux a atteint 739 mg/100g de muscle à 55 kg et a augmenté ($P=0,02$) jusqu'à 1 105 mg/100g à 85 kg. Ceci représente une augmentation de +50 % des acides gras totaux dans les triglycérides intramusculaires à mesure que la maturité physiologique des porcs progresse avec leur âge. L'apport alimentaire croissant d'huile de menhaden a augmenté quadratiquement la quantité des acides gras n-3 à longue chaîne ($P\leq 0,01$) dans les phospholipides membranaires de 9,1 jusqu'à 66,3 mg/100g de muscle frais chez les porcs de 55 kg; ceux-ci ont progressé davantage de 6,6 jusqu'à 68 mg/100g lorsque les porcs pesaient 85 kg. Parallèlement, la quantité en acides gras n-3 à longue chaîne des triglycérides intramusculaires a augmenté linéairement ($P=0,001$) à 55 kg de 0,20 jusqu'à 26,0 mg/100g de muscle frais avec l'addition croissante de l'huile de menhaden. À 85 kg, cette concentration a été rehaussée ($P=0,0001$) de 0,81 jusqu'à 34,0 mg/100g de muscle frais.

Quant aux acides gras n-6 des phospholipides totaux, l'addition croissante d'huile de menhaden au régime des porcs les a fait diminuer linéairement ($P=0,03$) de 149 jusqu'à 122 mg/100g de muscle frais à 85 kg. Aucun effet de traitement n'était observé à 55 kg. La consommation d'huile de menhaden durant la croissance des porcs n'a pas modifié les acides gras n-6 totaux

dans les triglycérides intramusculaires dont la teneur moyenne est de 73 mg/100 g de muscle frais. L'enrichissement des phospholipides membranaires et des triglycérides intramusculaires en acides gras n-3 avec l'huile de menhaden a entraîné une diminution linéaire ($P < 0,05$) du ratio n-6 : n-3 lors des deux périodes de croissance. Sur une base quantitative, les acides gras mono-insaturés, polyinsaturés et saturés demeurent inchangés dans les triglycérides intramusculaires, peu importe le traitement et la période. Cette réponse contraste avec celle des phospholipides membranaires où les mono-insaturés ont diminué linéairement ($P = 0,03$ et $P = 0,005$) de 77, 61 jusqu'à 65 mg/100 g de muscle chez les porcs à 55 kg. Cette diminution progresse davantage de 70, 54 jusqu'à 51 mg/100 g chez les porcs à 85 kg. Finalement, les apports croissants d'huile de menhaden ont augmenté ($P = 0,01$) les acides gras saturés dans les phospholipides de 137 jusqu'à 163 mg/100 g de muscle (en moyenne) chez les porcs à 55 kg, mais cet effet n'était plus visible chez les porcs plus âgés.

Tableau 7. Composition en acides gras (mg/100g de tissu frais) des phospholipides membranaires et des triglycérides intramusculaires de la longe chez des porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg¹

	Période (kg)	Traitement			Erreur type	Effet des traitements	
		0 %	3 %	4 %		Lin	Quad
Phospholipides							
∑ saturés	55	136,5	165,3	162,6	7,7	0,01	0,35
	85	122,1	145,2	138,1	6,9	0,06	0,23
∑ polyinsaturés	55	181,8	233,2	217,1	11,4	0,01	0,10
	85	157,0	198,5	191,6	10,2	0,02	0,26
Phospholipides							
∑ mono-insaturés	55	77,0	60,9	65,0	4,6	0,03	0,23
	85	70,3	54,4	50,9	4,2	0,005	0,81
∑ n-3 totaux	55	11,5	66,9	68,2	3,3	<,0001	0,008
	85	7,8	65,7	69,5	2,9	<,0001	0,01
∑ n-3 LC	55	9,1	64,9	66,3	3,2	<,0001	0,007
	85	6,6	63,5	68,0	2,8	<,0001	0,01
∑ n-6 totaux	55	170,2	166,4	148,9	8,7	0,13	0,28
	85	149,2	132,9	122,1	7,8	0,03	0,69
n-3 / n-6	55	0,07	0,40	0,46	0,01	<,0001*	0,007**
	85	0,05	0,50	0,57	0,009	<,0001	,0007
n-6 / n-3	55	15,0	2,5	2,2	2,5	,0009*	0,36
	85	22,9	2,0	1,8	2,2	<,0001	0,11
Acides gras totaux	55	396	360	445	23	0,05	0,33
	85	349	398	381	21	0,17	0,33
Triglycérides							
∑ saturés	55	297,4	258,4	351,8	96,4	0,81	0,52
	85	439,2	396,4	470,4	88,4	0,93	0,57

	Période	Traitement			Erreur type	Effet des traitements	
	(kg)	0 %	3 %	4 %		Lin	Quad
∑ polyinsaturés	55	67,6	72,7	114,8	22,5	0,21	0,30
	85	85,1	85,7	131,3	20,6	0,23	0,22
∑ mono-insaturés	55	380,8	321,0	434,5	125,7	0,89	0,53
	85	536,5	501,4	594,3	116,4	0,84	0,61
∑ n-3 totaux	55	3,8	15,8	32,5	5,4	0,003	0,18
	85	4,6	21,7	41,0	4,9	,0004	0,13
∑ n-3 LC	55	0,20	11,3	25,7	4,2	0,001	0,15
	85	0,81	17,1	33,7	3,8	,0001	0,11
∑ n-6 totaux	55	63,8	56,9	82,4	17,6	0,59	0,36
	85	80,5	64,0	90,4	16,2	0,91	0,27
n-3 / n-6	55	0,05	0,28	0,39	0,01	<,0001*	0,09
	85	0,04	0,34	0,45	0,01	<,0001	0,31
n-6 / n-3	55	12,1	3,6	2,5	2,1	0,003	0,62
	85	8,4	3,0	2,2	1,9	0,03	0,76
Acides gras totaux	55	746	647	819	318	0,92	0,95
	85	1501	984	1196	294	0,36	0,46

¹Moyenne des moindres carrés, n=5

*Interaction traitement x périodes (linéaire ou quadratique) significatives * signifie P < 0,05; ** signifie P < 0,01

Paramètres sanguins à jeun (insuline, glucose, urée, acides aminés). L'huile de menhaden, riche en acides gras n-3 à longue chaîne, a eu différents effets sur les paramètres sanguins mesurés chez les porcs à jeun. Tout d'abord, les concentrations d'insuline montrent les effets de la progression physiologique de l'âge des animaux par l'augmentation ($P=002$) de la concentration plasmatique de l'insuline à jeun de 2,55 jusqu'à 3,35 μmL^{-1} chez les porcs de 55 et 85 kg, respectivement (figure 3). L'huile de menhaden n'a pas eu d'effet sur la teneur en insuline plasmatique durant la période de 30-55 kg. Quoique la concentration de l'insuline à jeun ait été légèrement augmentée par l'âge des porcs, l'huile de menhaden a tendu à réduire l'insuline chez les porcs à 85 kg. En effet, l'huile de menhaden tend à réduire quadratiquement ($P=0,09$) l'insuline à jeun plasmatique des porcs à 85 kg pratiquement au niveau de base observé à 55 kg (de 3,35, 3,93 jusqu'à 2,93 μmL^{-1} pour les apports 0, 3 et 4 % d'huile de menhaden, respectivement). Les teneurs sériques en glucose et urée sont demeurées inchangées avec des concentrations moyennes de 4,9 et 4,7 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivement (figure 3).

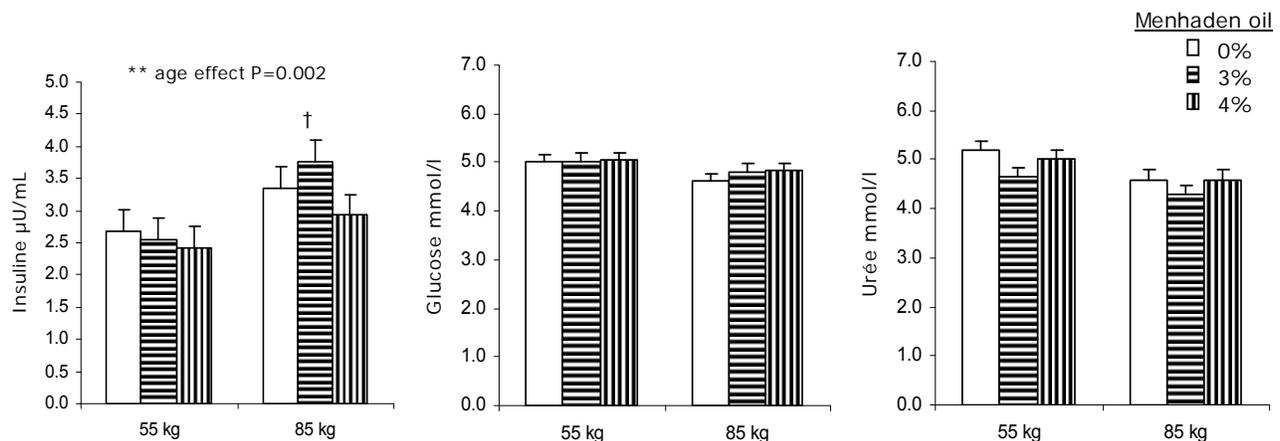


Figure 3: Effets des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden sur l'insuline plasmatique à jeun et le glucose ainsi que l'urée sériques à jeun selon l'âge des porcs. † signifie tendance pour une réduction quadratique de l'insuline à jeun chez les porcs à 85 kg, $P=0.09$. $n=13$, les barres d'erreur sont les erreurs types

Quant aux acides aminés plasmatiques, ils ont été mesurés à jeun à différents intervalles afin de vérifier les impacts de l'huile de menhaden sur le contrôle du métabolisme de la protéine par l'insuline (figure 4). Alors que des changements sont survenus au niveau de l'insuline plasmatique chez les porcs à 85 kg, les concentrations des acides aminés essentiels plasmatiques telles que la méthionine et l'arginine ont aussi été modifiées. À 85 kg, les teneurs tendent à être diminuées linéairement ($P=0,10$) lorsque l'huile de menhaden est incorporée aux régimes des porcs au taux de 0, 3 et 4 % (diminution variant de -6 jusqu'à -12 %) (figure 4). Les teneurs en acides aminés non essentiels telles que l'alanine, la proline et la tyrosine ont été réduites ($P<0,05$) et ont tendu à diminuer ($P<0,10$) selon l'apport alimentaire d'huile de menhaden chez les porcs à 55 ou 85 kg, respectivement (baisse variant -6 à -22 %) (figure 4). Les changements dans les concentrations de certains acides aminés non essentiels sont associés à une diminution linéaire ($P=0,01$) chez les porcs à 55 kg ou une tendance pour une réduction linéaire ($P=0,07$) chez les porcs à 85 kg de la somme des acides aminés qui servent de navette pour le transport de l'azote dans le sang (réduction variant de -11 à -13 %) (figure 5).

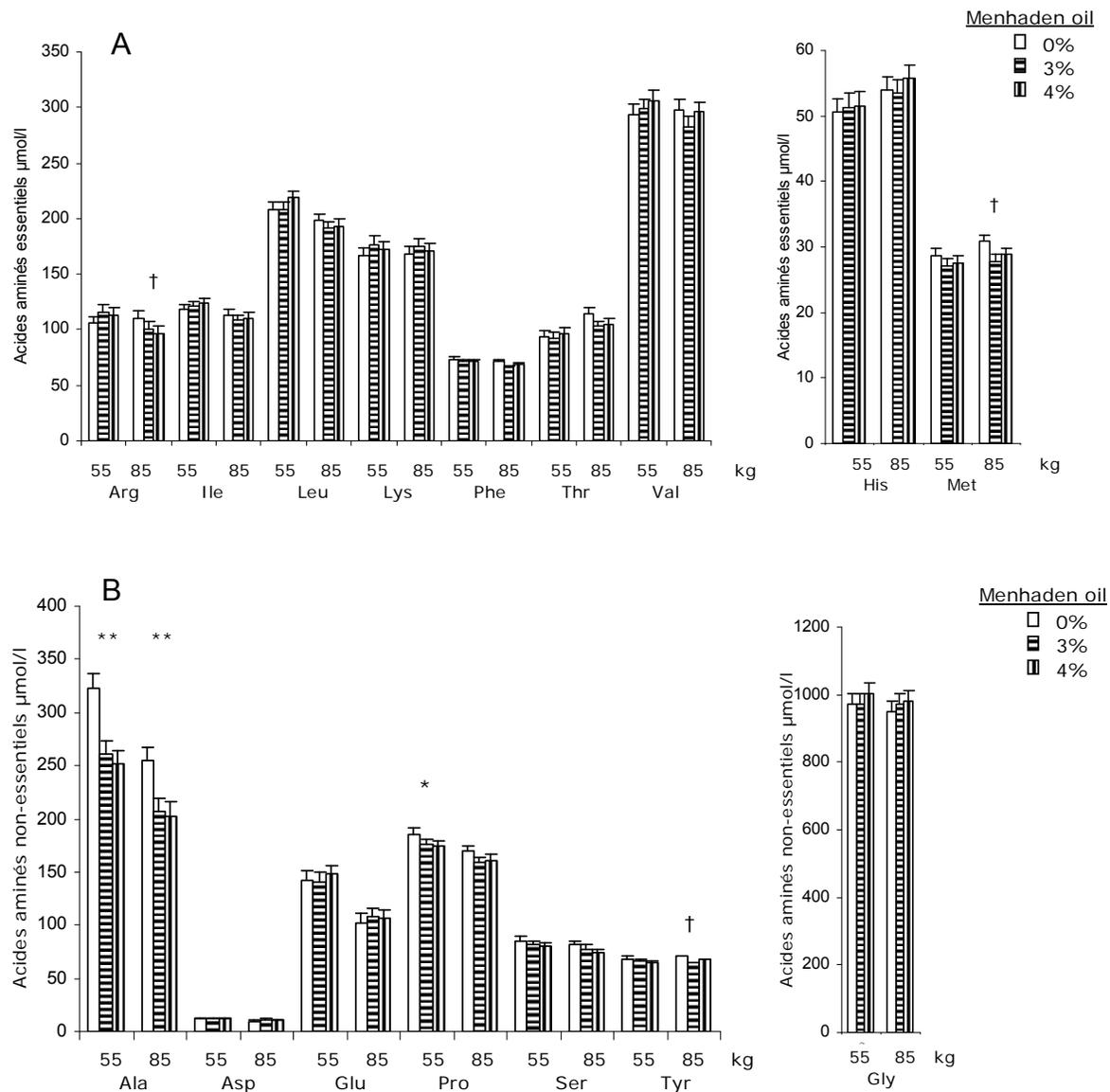


Figure 4: Effets des apports alimentaires croissants d'huile de menhaden sur les concentrations à jeun plasmatiques en acides aminés. (A): Arg, arginine; Ile, isoleucine; Leu, leucine; Lys, lysine; Phe, phénylalanine; Thr, thréonine; His, histidine; Met, méthionine. (B): Ala, alanine; Asp, aspartate; Glu, glutamic acid; Pro, proline; Ser, serine; Tyr, tyrosine; Gly, glycine. * $P \leq 0.05$, ** $P < 0.001$, † $P \leq 0.10$. $n=13$, barres d'erreur sont les erreurs types.

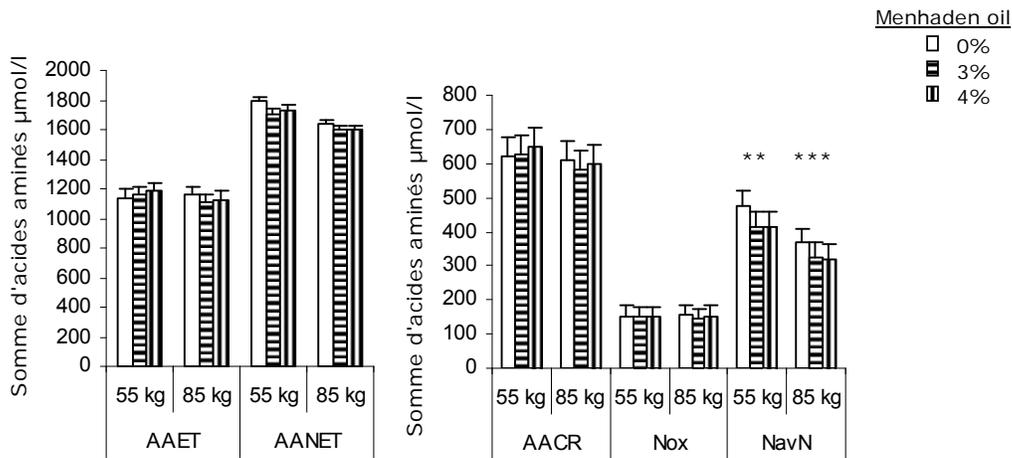


Figure 5: Effets de traitement sur les sommes d'acides aminés à jeun. AAET, acides aminés essentiels totaux; AANET, acides aminés non essentiels totaux; AACR acides aminés à chaînes ramifiées; Nox, acides aminés peu oxydés au niveau corporel; NavN, acides aminés qui servent de navettes pour transporter l'azote entre les tissus. ** $P=0.01$, *** $P<0.001$. $n=13$, barres d'erreur sont les erreurs types.

Performances et composition corporelle. Les apports alimentaires croissants de l'huile de menhaden influencent différemment les performances des animaux durant les périodes de 30-55 kg et 55-85 kg (tableau 8). Alors que des changements tendent à survenir au niveau des concentrations à jeun de l'insuline et de certains acides aminés plasmatiques chez les porcs plus âgés, des changements de performance sont observés durant ce même intervalle (55-85 kg). Ceci met en évidence le fait que la réponse physiologique des animaux aux apports d'huile de menhaden n'est pas automatique, un certain délai serait potentiellement nécessaire avant de pouvoir détecter des changements dans les performances. Comparativement aux porcs témoins à 85 kg, la prise alimentaire tend à diminuer ($P=0,07$) de -3,2 % lorsque les animaux reçoivent 4 % d'huile de menhaden (tableau 8). Cette baisse d'ingestion se traduit en une réduction linéaire ($P=0,01$) de la protéine ingérée (-5 %) et d'une tendance à la baisse ($P=0,09$) de l'énergie digestible ingérée (-3 %). Simultanément, le gain moyen quotidien de animaux à 85 kg diminue linéairement ($P=0,02$) de -5,4 jusqu'à -6,2 % avec 3 et 4 % d'huile de menhaden, respectivement, et de façon différentielle entre les deux âges (interaction significative). Quoique les porcs de 85 kg supplémentés avec 3 et 4 % d'huile de menhaden montrent une ingestion et un gain moyen quotidien réduits par rapport au traitement témoin, leur efficacité à convertir les aliments en gain de poids est demeurée inchangée. La conversion alimentaire est de 1,9 et 2,5 en moyenne à 55 et 85 kg, respectivement. L'ingestion d'eau a été augmentée linéairement avec les apports croissants d'huile de menhaden chez les porcs à 55 kg, mais ceci n'était plus observé lorsqu'ils pesaient 85 kg. À 55 kg, l'épaisseur du muscle de la longe est demeurée inchangée avec une épaisseur moyenne de 46,8 mm. De façon consistante avec les observations faites lorsque les porcs pèsent 85 kg, les apports croissants de 3 et 4 % d'huile de menhaden ont fait augmenter linéairement ($P=0,03$) l'épaisseur du muscle de la longe de +1 et +4 % respectivement. Les mesures pour chacun des traitements alimentaires étaient de 55,2, 55,7 et 57,5 mm (tableau 8). Quant à l'épaisseur de gras dorsal mesurée avec un appareil à ultrasons, les traitements d'huile de menhaden n'ont pas eu d'effet sur ce paramètre. Ainsi, l'épaisseur de gras des porcs de 55 kg est en moyenne de 9,8 mm et a progressé jusqu'à 12,5 mm à 85 kg de poids.

Tableau 8. Performances zootechniques et nutriments ingérés chez des porcs recevant des apports croissants d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg^{1,2}

	Période	Traitement			Erreur-type	Effet des traitements	
	(kg)	0 %	3 %	4%		Lin	Quad
Ingestion quotidienne par porc							
Ingéré par porc (kg/j)	55	1,97	1,93	1,95	0,03	0,60	0,68
	85	2,50	2,42	2,42	0,03	0,07	0,72
Energie digestible (kcal/j) ³	55	7222	7121	7183	122	0,71	0,65
	85	9181	8899	8915	122	0,09	0,60
Protéine brute (g/j)	55	379,0	367,2	365,0	6,1	0,09	0,86
	85	439,3	424,4	417,3	6,1	0,01	0,84
Lysine digestible (g/j) ⁴	55	21,2	20,9	21,4	0,3	0,94	0,27
	85	24,7	24,0	23,9	0,3	0,07	0,74
Méthionine digestible (g/j) ⁴	55	6,7	6,6	6,8	0,1	0,64	0,13
	85	7,5	7,3	7,2	0,1	0,07	0,75
Thréonine digestible (g/j) ⁴	55	13,8	13,5	14,0	0,2	0,67	0,14
	85	16,0	15,5	15,5	0,2	0,07	0,74
eau (L/j)	55	4,9	6,2	5,8	0,8	0,03	0,46
	85	7,6	8,7	8,0	1,0	0,09	0,90
Performance							
Poids vif (kg)	55	59,9	59,2	60,3	0,6	0,95	0,20
	85	87,6	85,2	86,7	0,6	0,12	0,05
Gain moyen quotidien (kg/d)	55	1,04	1,01	1,06	0,02	0,20	0,84
	85	1,03	0,97	0,97	0,02	0,02*	0,36
Conversion alimentaire	55	1,89	1,91	1,84	0,04	0,36	0,52
	85	2,43	2,48	2,48	0,04	0,26	0,78
Efficacité de l'utilisation des nutriments pour le gain							
Energie digestible (kcal/kg gain)	55	6 951	7 047	6 804	133	0,65	0,23
	85	8 960	9 251	9 172	133	0,17	0,44
Protéine brute (g/kg gain)	55	364,8	363,3	345,8	6,5	0,10	0,13
	85	428,7	441,2	429,4	6,5	0,62	0,16
Lysine digestible (g/kg gain)	55	20,4	20,7	20,3	0,4	0,94	0,48
	85	24,1	24,9	24,6	0,4	0,24	0,37

	Période	Traitement			Erreur -type	Effet des traitements	
	(kg)	0 %	3 %	4%		Lin	Quad
<i>Longe et gras dorsal – mesures à ultrasons</i>							
Profondeur de la longe (mm) ⁵	55	44,89	44,76	45,88	0,59	0,37	0,26
	85	55,24	55,56	57,54	0,59	0,03	0,07
Profondeur de la longe corrigée pour le poids (mm/kg) ⁵	55	0,7527	0,7599	0,7619	0,0099	0,49	0,98
	85	0,6311	0,6540	0,6668	0,0099	0,02	0,76
Indice calculé de la surface de la longe corrigé pour le poids (cm ² /kg) ⁶	55	0,3390	0,3409	0,3484	0,0090	0,53	0,65
	85	0,3502	0,3639	0,3826	0,0090	0,02	0,36
Épaisseur de gras dorsal (mm) ⁵	55	9,72	9,57	10,03	0,43	0,74	0,49
	85	12,48	12,10	13,05	0,43	0,59	0,15

¹ Moyenne des moindres carrés; n=13

² Analyses statistiques faites en appliquant une covariable correspondante au poids initial du début de l'expérience

³ Equations de Noblet utilisées dans l'estimation de l'énergie digestible

⁴ Calculs utilisant les valeurs tabulées du modèle de formulation du CDPQ

⁵ Mesures effectuées sur l'animal vivant avec un appareil à ultrasons au niveau de la 3^e et de la 4^e avant-dernières côtes

⁶ Indice calculé de la façon suivante: [Épaisseur de la longe]²/[poids en kg]; le poids corporel étant mesuré le jour avant ou après la mesure à ultrasons

*Interaction respective traitement x période (linéaire) significative, * signifie P < 0,05

La relation entre la composition en acides gras de la longe et l'indice calculé de la surface de la longe normalisée pour le poids corporel a été explorée en utilisant les moyennes des traitements (moyennes des moindres carrés présentées dans les tableaux 5 et 8) à 55 et 85 kg (figure 6). Cet indice calculé, qui fournit des conclusions similaires aux épaisseurs de la longe normalisée pour le poids, a été utilisé dans les analyses suivantes car il rend l'expression graphique des données plus visuelle et plus claire. Des modèles de régressions de type polynomiaux offraient le meilleur ajustement aux données et ont donc été utilisés. Cette exploration des données montre que les acides gras n-3 à longue chaîne pourraient être étroitement liés à l'indice calculé de la surface de la longe normalisée pour le poids avec un r² de 0,91 (P=0,03). Des observations similaires étaient obtenues quand les acides gras individuels C20:5 n-3 (r² 0,91; P=0,03), C22:6 n-3 (r² 0,92; P=0,02), ou le ratio n-3 : n-6 (r² 0,94; P=0,01) étaient utilisés.

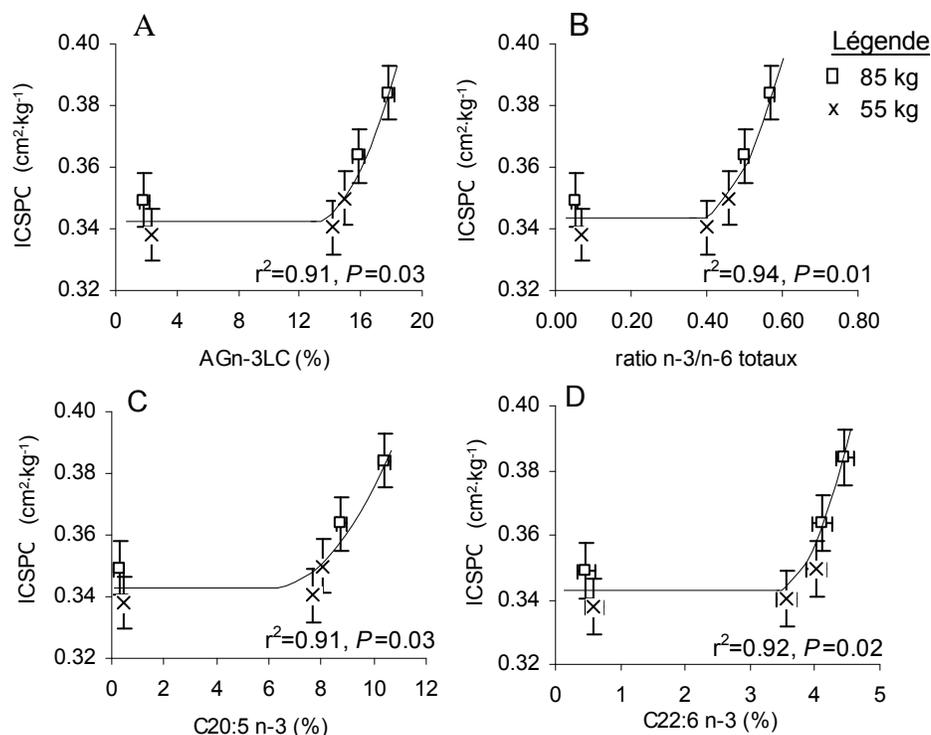


Figure 6: Relation entre la composition des acides gras (individuels ou fractions) des phospholipides membranaires de la longe (% des acides gras totaux) et de l'indice calculé de la surface de la longe normalisée pour le poids corporel (ICSLPC; $\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) selon un modèle polynomial qui utilise les moyennes des moindres carrés avec les barres d'erreur représentées par les erreurs types. (A) $Y=0,622-0,044x+0,0017x^2$; (B) $Y=0,489-0,784x+1,060x^2$; (C) $Y=0,448-0,033x+0,0026x^2$; (D) $Y=0,828-0,279x+0,040x^2$.

Dans cette étude, l'enrichissement des globules rouges en acides gras n-3 à longue chaîne a été étudié en fonction de celui des membranes de la longe pour explorer si les globules rouges pourraient prédire la teneur en n-3 à longue chaîne des muscles (figure 7). Le but serait de minimiser la pratique de biopsies musculaires qui sont invasives dans de futures études. La teneur en acides gras n-3 à longue chaîne dans les globules rouges est étroitement liée à celle du muscle de la longe avec une valeur r^2 de 0,95 ($P<0,001$; graphique 7A). Les acides gras n-3 à longue chaîne des globules rouges sont liés à l'indice calculé de la surface de la longe normalisée pour le poids avec une valeur r^2 de 0,21 ($P=0,004$; graphique 7B). Lorsque les moyennes par traitement sont utilisées pour examiner cette relation, ce qui centre les données graphiques au milieu du nuage de point et réduit la variation, une valeur r^2 de 0,94 ($P=0,01$; graphique 7D) est alors obtenue. Il apparaît que les membranes des globules rouges pourraient atteindre un plateau dans leur teneur en n-3 à longue chaîne avant les membranes du muscle puisque très peu de différence est observée entre les traitements 3 et 4 % (graphique 7C).

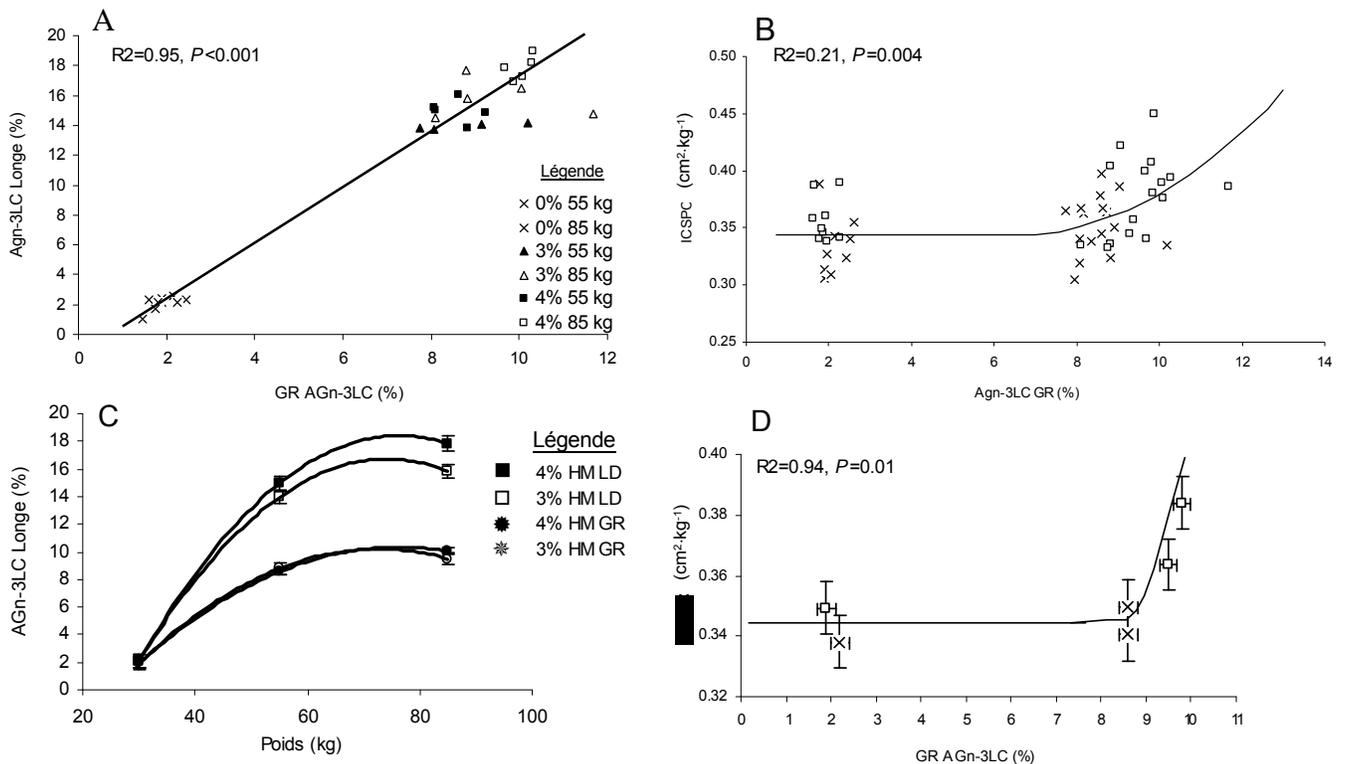


Figure 7: Relation entre les acides gras n-3 à longue chaîne (AGn-3LC) des globules rouges (GR) et l'indice calculé de la surface de la longe normalisée pour le poids corporel (ICSLPC; $\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$), ou entre l'âge des porcs et la quantité d'AGn-3LC dans les phospholipides membranaires de la longe ou des GR. (A) montre la relation linéaire entre les AGn-3LC dans les GR et ceux de la longe (ou longissimus dorsi, LD) utilisant les données individuelles, modèle linéaire $Y = -1,05 + 1,80x$, (biopsie musculaire, $n=5$); (B) relation entre les AGn-3LC des GR et l'indice calculé de la surface de la longe normalisée pour le poids (ICSLPC; $\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) selon un modèle polynomial utilisant les données individuelles avec les barres d'erreur représentées par les erreurs types (GR, $n=10$) $Y = 0,407 - 0,022x + 0,0019x^2$; (C) teneur en AGn-3LC des membranes de la longe ou des GR selon l'âge des porcs (niveau de base, 55, 85 kg) quant ils étaient alimentés avec 3 ou 4 % d'huile de menhaden; (D) relation entre les AGn-3LC des membranes de GR et de l'ICSLPC ($\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) utilisant la moyenne des moindres carrés par traitement avec les barres d'erreur représentées par les erreurs types, $Y = 0,488 - 0,784x + 1,060x^2$.

Expérimentation 2

Lorsque les porcs ont atteint un poids moyen de 85 kg, ils ont tous été transférés à un aliment témoin durant la période de finition qui s'est déroulée de 85 kg jusqu'à l'abattage à 115 kg. Pendant cette période, les effets du préconditionnement des lipides corporels par les traitements d'huile durant les phases de début et de croissance ont été étudiés (tableau 9). Une fois tous les porcs sur le régime de finition (0% d'huile de menhaden), l'ingestion quotidienne d'aliment de 85 à 115 kg a été la même ($2,9 \text{ kg} \cdot \text{j}^{-1}$ en moyenne), peu importe le traitement alimentaire appliqué au préalable. Les consommations quotidiennes d'énergie digestible, de protéine brute, de lysine, de méthionine et de thréonine ont été similaires, peu importe le traitement appliqué durant les périodes précédentes (30-55 et 55-85 kg). Le scénario est le même pour la conversion alimentaire qui est en moyenne de 3,1. L'épaisseur de gras dorsal mesurée à 100 kg avec un appareil à ultrasons demeure identique (15,2 mm en moyenne), peu importe le traitement appliqué au préalable (tableau 9). Par contre, la différence observée pour l'épaisseur du muscle de la longe à 85 kg est toujours présente à 100 kg de poids vif.

Cependant, l'augmentation quadratique ($P=0,004$) de l'épaisseur du muscle de la longe (jusqu'à +2%) durant l'intervalle 85-100 kg est de moindre amplitude que celle obtenue antérieurement (tableau 9). Les épaisseurs de muscle observées à 100 kg sont de 61,6, 62,2 et 62,7 mm avec 0, 3 et 4 % d'huile de menhaden, respectivement.

Tableau 9. Performances zootechniques et nutriments ingérés chez des porcs recevant une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg^{1,2}

Paramètre	Ration de finition 0 % d'huile de menhaden			Erreur type	Effet des traitements	
	Préconditionnement				Lin	Quad
	0%	3%	4%			
<i>Ingestion quotidienne par porc mesurée lors de la période de 85-115 kg</i>						
Ingéré (kg/j)	2,91	2,87	2,90	0,1	0,74	0,68
Énergie digestible (kcal/j) ³	10 655	10 491	10 593	220	0,74	0,68
Protéine brute (g/j)	463,9	456,7	461,2	9,6	0,74	0,68
<i>Performance mesurée lors de la période de 85-115 kg</i>						
Gain moyen quotidien (kg/d)	1,04	1,05	1,06	0,02	0,56	0,98
Conversion alimentaire †	3,08	3,11	3,00	0,07	0,57	0,30
<i>Longe et gras dorsal à 100 kg – mesures à ultrasons</i>						
Profondeur de la longe (mm) ⁴	61,4	60,4	62,6	0,7	0,52	0,04
Indice calculé de la surface de la longe corrigé pour le poids (cm ² /kg) ⁵	0,373	0,369	0,387	0,008	0,37	0,15
Épaisseur de gras dorsal (mm) ⁴	15,5	14,9	15,3	0,6	0,69	0,54
<i>Caractéristiques des carcasses à l'abattage à 115 kg‡</i>						
Poids vif (kg)	113,8	113,9	114,7	1,0	0,59	0,63
Poids chaud de la carcasse (kg)	92,0	92,0	93,1	0,7	0,40	0,34
Rendement de la carcasse (%)	81,2	80,8	81,1	0,3	0,59	0,30
Épaisseur de muscle (mm) ⁶	64,1	62,0	63,5	1,7	0,61	0,44
Épaisseur de gras (mm) ⁶	19,6	18,3	19,2	0,8	0,50	0,33
Rendement en viande maigre (%) ⁷	60,3	61,2	60,5	0,3	0,34	0,10
Indice de classement ⁸	110,8	111,3	110,5	0,6	0,99	0,30

¹ Moyenne des moindres carrés; n=13

² Analyses statistiques faites en appliquant une covariable correspondante au poids initial du début de l'expérience 2, soit à 85 kg

³ Equations de Noblet utilisées dans l'estimation de l'énergie digestible

⁴ Mesures effectuées sur l'animal vivant avec un appareil à ultrasons au niveau de la 3^e et la 4^e avant-dernières côtes

⁵ Indices calculés de la façon suivante: [profondeur de la longe]²/[poids en kg]; le poids corporel étant mesuré le jour avant ou après la mesure à ultrasons

⁶ Mesurée en abattoir avec une sonde invasive Destron

⁷ Estimé à partir d'une équation de prédiction. Source : Site de la Fédération des producteurs de porcs du Québec [En ligne] <http://www.fppq.upa.qc.ca/documents/Producteurs/Gestdap-guide-technique.PDF> (Page consultée le 10 septembre 2009)

⁸ Obtenue en considérant le rendement en viande maigre et le poids de la carcasse moyen de l'unité expérimentale (parc)

† Paramètre analysé statistiquement sans covariable puisque cette dernière était non significative

‡ Paramètres analysés statistiquement sans covariable comme détaillé dans la section matériel et méthode

Caractéristiques de la carcasse. Le poids vif final et le poids chaud de la carcasse, le rendement de la carcasse et les épaisseurs de muscle et de gras (mesurés en abattoir avec une sonde Destron) sont similaires entre les traitements d'huile appliqués antérieurement (tableau 9). Le rendement en viande maigre, lequel est une estimation de la composition de la carcasse calculée à partir des épaisseurs de gras et de muscle, tendait à augmenter ($P=0,10$; effet quadratique) avec les traitements d'huile de menhaden appliqués antérieurement lors de l'intervalle de poids 30-85 kg. Malgré la tendance observée pour ce dernier paramètre, l'indice de classement qui est déterminé à partir du rendement en viande maigre et du poids chaud de la carcasse, ne ressort pas différent entre les traitements.

Composition en acides gras des phospholipides musculaires, des triglycérides intramusculaires et du gras dorsal. Le préconditionnement des lipides corporels des porcs avec l'huile de menhaden lors des périodes de 30-55 kg et de 55-85 kg a eu un effet différentiel sur la composition des fractions de lipides de la longe lorsque les porcs étaient en finition (tableaux 10, 11, 12). La fraction des acides gras saturés est demeurée similaire entre les porcs avec des teneurs moyennes de 35 % dans les phospholipides, de 41 % dans les triglycérides intramusculaires et de 40 % dans le gras dorsal. Les acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides membranaires ont été augmentés quadratiquement ($P=0,02$) par le préconditionnement à l'huile de menhaden avec des teneurs moyennes de 2,1, 14,2, 15,2 %. Ces acides gras étaient augmentés linéairement ($P=0,0001$) dans les triglycérides intramusculaires avec des teneurs moyennes de 0,09, 1,20, 2,09 %. Les acides gras n-6 étaient encore réduits linéairement par les traitements antérieurs d'huile de menhaden dans les phospholipides ($P<0,0001$) et le gras dorsal ($P<0,0006$), mais n'étaient pas différents dans les triglycérides intramusculaires.

Tableau 10. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des membranes de phospholipides de la longe chez des porcs recevant une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg¹

Acides gras	Ration de finition 0 % d'huile de menhaden			Erreur type	Effet des traitements	
	Préconditionnement				Lin	Quad
	0 %	3 %	4 %			
C14:0	0,30	0,20	0,14	0,07	0,14	0,83
C16:0	19,5	19,7	20,9	0,8	0,35	0,41
C16: 1 n-7	1,1	0,75	0,85	0,09	0,06	0,22
C18:0	14,0	14,5	15,3	0,5	0,17	0,52
C18:1 n-9	13,9	8,9	9,5	0,4	<,0001	0,006
C18:1 n-7	2,2	2,4	2,5	0,1	0,005	0,83
C18:2 n-6	31,2	28,1	26,5	0,9	0,002	0,71
C18:3 n-3	0,59	0,48	0,37	0,07	0,04	0,50
C20:3 n-6	1,4	1,4	1,3	0,1	0,66	0,60
C20:4 n-6	9,7	6,8	5,6	0,5	<,0001	0,80
C20:5 n-3	0,43	7,2	8,1	0,4	<,0001	0,08
C22:4 n-6	1,3	0,28	0,13	0,06	<,0001	0,07
C22:5 n-3	1,2	3,2	3,2	0,2	<,0001	0,06
C22:6 n-3	0,50	3,8	3,9	0,3	<,0001	0,04
C24:1 n-9	0,41	0,36	0,42	0,07	0,99	0,55
∑ saturés	34,9	35,1	37,1	0,9	0,16	0,23
∑ polyinsaturés	47,2	51,8	49,5	1,2	0,07	0,09
∑ mono-insaturés	17,7	12,5	13,3	0,5	<,0001	0,02
∑ n-3 total	2,8	14,6	15,5	0,6	<,0001	0,02
∑ n-3 LC	2,2	14,1	15,2	0,6	<,0001	0,02
∑ n-6 total	44,4	37,2	34,0	0,9	<,0001	0,59
n-3/n-6	0,06	0,39	0,46	0,02	<,0001	0,11
n-6/n-3	16,2	2,6	2,2	0,6	<,0001	0,001

¹Moyenne des moindres carrés, n=5

Tableau 11. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des triglycérides intramusculaires de la longe chez des porcs recevant une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg¹

Acide gras	Ration de finition 0 % d'huile de menhaden			Erreur type	Effet des traitements	
	Préconditionnement				Lin	Quad
	0 %	3 %	4 %			
C14:0	1,8	1,5	0,81	0,20	0,009	0,13
C16: 0	26,4	25,1	25,2	0,4	0,03	0,45
C16: 1 n-7	3,5	3,2	2,0	0,5	0,10	0,27
C18: 0	13,1	14,2	13,7	0,3	0,12	0,19
C18:1 n-9	43,7	43,0	43,3	0,9	0,67	0,74
C18: 1 n-7	4,0	3,9	3,9	0,2	0,80	0,87
C18: 2 n-6	5,7	5,7	6,4	0,8	0,64	0,66
C18: 3 n-3	0,21	0,39	0,48	0,08	0,03	0,83
C20: 3 n-6	0,03	0,03	0,05	0,02	0,53	0,52
C20: 3 n-3	0,02	0,01	0,04	0,02	0,62	0,27
C20: 4 n-6	0,12	0,15	0,17	0,05	0,53	0,90
C20: 5 n-3	0,02	0,34	0,68	0,10	,0006	0,17
C22: 4 n-6	0,03	0,01	0,008	0,01	0,30	0,98
C22: 5 n-3	0,03	0,47	0,74	0,08	< ,0001	0,37
C22: 6 n-3	0,02	0,39	0,63	0,08	,0002	0,40
C24:1 n-9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
∑ saturés	41,6	41,1	40,1	0,5	0,08	0,32
∑ polyinsaturés	6,4	7,8	9,5	1,1	0,09	0,54
∑ mono-insaturés	51,8	50,7	49,9	1,3	0,30	0,84
∑ n-3 total	0,30	1,6	2,6	0,3	,0003	0,32
∑ n-3 LC	0,09	1,2	2,1	0,3	,0001	0,25
∑ n-6 total	6,1	6,2	6,9	0,8	0,56	0,66
n-3/n-6	0,05	0,26	0,37	0,02	< ,0001	0,26
n-6/n-3	8,2	3,9	2,8	2,1	0,08	0,94

¹Moyenne des moindres carrés, n=5

Tableau 12. Composition en acides gras (% des acides gras totaux) du gras dorsal des porcs abattus à 115 kg qui ont reçu une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg¹

Acides gras	Ration de finition 0 % d'huile de menhaden			Erreur type	Effet des traitements	
	Préconditionnement				Lin	Quad
	0 %	3 %	4 %			
C14:0	1,8	1,4	1,3	0,1	<,0001	0,12
C16:0	23,9	23,6	23,5	0,3	0,35	0,94
C16:1 n-9	1,8	2,0	2,2	0,08	0,004	0,34
C18:0	13,7	15,7	16,0	0,5	0,003	0,72
C18:1 n-9	39,9	37,2	35,5	0,7	,0008	0,48
C18:1 n-7	2,5	2,9	3,0	0,1	,0005	0,95
C18:2 n-6	13,7	12,1	12,0	0,3	0,002	0,38
C18:3 n-3	0,74	0,83	0,72	0,11	0,92	0,47
C20:0	0,22	0,25	0,20	0,05	0,92	0,42
C20:1 n-9	0,80	0,72	0,51	0,08	0,05	0,25
C20:2 n-6	0,57	0,48	0,36	0,06	0,03	0,36
C20:4 n-6	0,19	0,10	0,12	0,04	0,12	0,46
C20:5 n-3	0,00	0,72	1,28	0,1	<,0001	0,02
C22:5 n-3	0,00	0,92	1,31	0,02	<,0001	0,07
C22:6 n-3	0,00	0,86	1,24	0,1	<,0001	0,31
C24:0	0,10	0,07	0,02	0,03	0,09	0,38
∑ saturés	39,8	40,9	41,1	0,6	0,13	0,85
∑ polyinsaturés	15,2	16,0	17,1	0,5	0,02	0,32
∑ mono-insaturés	44,9	42,8	41,2	0,8	0,005	0,51
∑ n-3 total	0,74	3,3	4,6	0,2	<,0001	0,32
∑ n-3 LC	0,00	2,5	3,8	0,1	<,0001	0,06
∑ n-6 total	14,5	12,7	12,5	0,3	,0006	0,44
n-3/n-6	0,05	0,26	0,36	0,01	<,0001	0,25
n-6/n-3	19,7	3,8	2,8	0,3	<,0001	<,0001

¹Moyenne des moindres carrés, n=5.

Les indices nutritionnels des lipides de la longe, qui combinent les phospholipides et les triglycérides, montrent que la longe contenait en moyenne 652 mg d'acides gras par 100 g de longe et 243 mg d'acides gras n-6 par 100 g de longe (tableau 13). Les acides gras n-3 à longue chaîne représentaient la majorité des n-3 avec une teneur qui a augmenté linéairement ($P<0,0001$) de 10, 74, 94 mg/100 g. Le ratio n-6 : n-3 a été réduit linéairement ($P<0,0001$) de 17, 3, à 2 avec les traitements antérieurs de la période de 30-85 kg. Les acides gras n-3 représentaient 4 % des lipides totaux du muscle, et les n-3 à longue chaîne représentaient 3 % de ces derniers.

Tableau 13. Indices nutritionnels de la longe considérant les lipides totaux de la longe (phospholipides et triglycérides combinés) chez des porcs abattus à 115 kg qui ont reçu une ration témoin de finition lors de la période de croissance 85-115 kg^{1,2}

	Ration de finition 0 % d'huile de menhaden			Erreur type	Effet des traitements	
	Préconditionnement				Lin	Quad
	0 %	3 %	4 %			
Mg/100 g tissu frais						
SAT	653	671	631	65	0,90	0,68
MONO	711	712	682	87	0,86	0,84
POLY	260	313	355	28	0,04	0,62
n-3 POLY	15	81	103	6	<,000 1	0,98
n-6 POLY	245	232	251	22	0,98	0,53
n-3 POLY LC	10	74	94	5	<,000 1	0,84
POLY/SAT	0.40	0.48	0.58	0.05	0,04	0,38
n-6/n-3	17.4	2.9	2.4	1.0	<,000 1	0,03
Total TG dans le muscle	1623	1695	1512	188	0,79	0,50
Total TG dans le gras dorsal	76	72	71	2	0,09	0,87
% total de gras						
SAT	40	40	31	4	0,21	0,23
MONO	44	41	40	1	0,03	0,65
POLY	16	19	19	2	0,27	0,74
n-3 POLY	0.9	4.9	5.6	0.6	<,000 1	0,54
n-6 POLY	15	14	15	1	0,71	0,30
n-3 POLY LC	0.6	4.5	5.1	0.5	<,0001	0,48

¹Moyenne des moindres carrés, n=5

SAT, somme des acides gras saturés; MONO, somme des acides gras mono-insaturés; POLY, somme des acides gras polyinsaturés; n-3 POLY, somme des n-3 totaux; n-6 POLY, somme des n-6 totaux; n-3 POLY LC, somme des acides gras n-3 polyinsaturés à longue chaîne (C20:5 n-3 + C22:5 n-3 + C22:6 n-3); POLY/SAT, rapport de la somme des acides polyinsaturés sur les acides gras saturés; n-6/n-3, rapport des acides gras n-6 totaux sur les acides gras n-3 totaux; Total TG dans le muscle, somme des acides gras totaux dans les triglycérides intramusculaires; Total TG dans le gras dorsal, somme des acides gras totaux dans les triglycérides du gras dorsal.

DISCUSSION

Objectif spécifique 1: *Établir la quantité minimale d'huile de menhaden qui permettrait d'améliorer les performances des porcs en croissance en utilisant une courbe dose-réponse.*

Cette étude a permis, pour la première fois, d'étudier les effets d'apports alimentaires croissants d'huile de menhaden (0, 3 et 4 %) offerts à des porcs sur une période continue de croissance entre 30 à 55 kg et 55 à 85 kg de poids. L'hypothèse soutient que cette approche enrichisse les membranes du muscle de la longe en acides gras n-3 à longue chaîne pour améliorer la déposition des protéines dans le muscle contrôlées par l'insuline. L'étude avait pour objectif de mesurer, à la fin de chacune des deux périodes de croissance, les effets sur les performances zootechniques, des paramètres sanguins mesurés à jeun et les épaisseurs du muscle de la longe et de gras dorsal mesurées avec un appareil à ultrasons. Lorsque le poids des porcs a atteint en moyenne 85 kg, une deuxième expérience a débuté. Dès ce moment, tous les porcs ont reçu le même aliment de finition de 85 kg jusqu'à l'abattage à 115 kg. Le but était de vérifier si les effets d'un préconditionnement des lipides corporels avec de l'huile de menhaden lors des périodes de début et de croissance se maintenaient après une période de retrait de l'huile de menhaden de 85 kg jusqu'à l'abattage à 115 kg. Afin d'étudier cette approche, une huile de poisson de haute qualité (huile de menhaden), contenant plus de 30 % d'acides gras n-3 à longue chaîne, a été utilisée. L'huile de menhaden offre la particularité de fournir aux porcs un apport relativement équilibré en acides gras C20:5 n-3 et C22:5 n-3 (ratio 60:40), tel que déjà employé lors d'études réalisées antérieurement (Bergeron *et al.*, 2007; Gingras *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009).

Objectif spécifique 2: *Étudier la composition en acides gras n-3 à longue chaîne des membranes des muscles et des triglycérides intramusculaires lors d'apports alimentaires croissants en huile de menhaden durant les périodes de début et de croissance.*

Les compositions en acides gras des lipides musculaires de structure (phospholipides membranaires) et d'entreposage (triglycérides) sont modifiées de façon différentielle par des apports croissants d'huile de menhaden et par l'âge des animaux (55 ou 85 kg). Traditionnellement, les phospholipides des muscles des porcs étaient connus pour être plus riches en acides gras polyinsaturés que les triglycérides et ces acides gras polyinsaturés étaient représentés majoritairement par des acides gras n-6 (Allen *et al.*, 1967). Aujourd'hui, les acides gras n-6 représentent encore une fraction majeure des phospholipides membranaires des porcs et avec moins d'acides gras n-3 (Kuksis, 1978; Wood *et al.*, 2004). Évidemment, on retrouve peu d'acides gras n-3 à longue chaîne dans les membranes, car le régime standard porcin est dépourvu en acides gras n-3 à longue chaîne qui est principalement d'origine marine. Il a été observé antérieurement que l'alimentation d'huile de poisson appauvrit les phospholipides membranaires des muscles (et/ou les lipides totaux extractibles) en acides gras n-6 (surtout C18 :2 n-6 ou C20 :4 n-6) et qu'elle les enrichit en acides gras n-3 (surtout les acides gras n-3 à longue chaîne). Ce phénomène a été observé chez le porc (Irie & Sakimoto, 1992; Otten *et al.*, 1993; Leskanich *et al.*, 1997; Jaturasitha *et al.*, 2009), l'agneau (Cooper *et al.*, 2004) et le bouvillon (Ashes *et al.*, 1992; Noci *et al.*, 2007).

L'amplitude de ce phénomène est en fonction du contenu en acides gras n-3 à longue chaîne de la diète puisque les huiles de poisson contiennent des quantités variables de C20:5 n-3 et C22:6 n-3. Des études réalisées antérieurement rapportent que l'ajout alimentaire de 1 et 4 % d'une huile de poisson, contenant 13 à 20 % d'acides gras n-3 à longue chaîne, avait fait augmenter la concentration de ces derniers dans les membranes musculaires chez des

moutons (Cooper *et al.*, 2004) et des bouvillons (Noci *et al.*, 2007). Les hausses observées étaient de 4,2 jusqu'à 11 % des acides gras totaux dans les phospholipides des muscles pendant un intervalle de croissance entre 29 à 40 kg chez les moutons (Cooper *et al.*, 2004) et du même ordre pour les bouvillons supplémentés durant une période de 108 jours (Noci *et al.*, 2007). Dans la présente étude, l'atteinte d'une teneur de 18 % d'acides gras n-3 à longue chaîne dans les membranes des muscles se produit principalement avec un apport alimentaire de 4 % d'huile de menhaden. Cet apport alimentaire contenait 31 % d'acides gras n-3 à longue chaîne et a été offert durant une période minimale de cinq semaines (Gingras *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009). La période du supplément est aussi importante pour enrichir les membranes musculaires en acides gras n-3 à longue chaîne puisque la composition des phospholipides et des triglycérides est dépendante du temps de l'application et de la dose offerte (Bergeron *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009). De plus, il faut noter que l'incorporation des acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides se fait de façon préférentielle en comparaison aux triglycérides (Stubbs & Smith, 1984; MacDonald & Sprecher, 1991). Ceci favorise davantage l'incorporation et l'augmentation de la teneur en n-3 à longue chaîne dans les phospholipides des membranes des muscles. Cependant, la substitution des acides gras n-6 par des n-3 dans les phospholipides est moins perceptible lorsque l'apport alimentaire en acides gras n-3 à longue chaîne est combiné à des quantités élevées d'acides gras n-6 (Ponnampalam *et al.*, 2001; Hsu *et al.*, 2004).

L'incorporation préférentielle des acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides membranaires avec l'huile de menhaden observée dans cette étude est également appuyée lorsque l'on étudie les données exprimées sous forme quantitative. Quoique l'on retrouve de plus grandes quantités de triglycérides que de phospholipides par 100 g de longe, les phospholipides contiennent en moyenne 2,5 fois plus de mg d'acides gras n-3 à longue chaîne par 100 g de longe que les triglycérides chez les porcs de 55 et 85 kg. Des quantités différentielles en acides gras n-3 à longue chaîne dans les membranes musculaires versus les triglycérides intramusculaires ont aussi été observées chez le porcelet nouveau-né et l'agneau (Ponnampalam *et al.*, 2001; Bergeron *et al.*, 2007). Les acides gras n-3 fortement insaturés, tels que les acides gras n-3 à longue chaîne, dans les phospholipides membranaires joueraient un rôle fonctionnel dans le contrôle de la fluidité des membranes et des fonctions cellulaires qui régulent l'utilisation des nutriments (Stubbs & Smith, 1984; Else & Hulbert, 2003). Une augmentation du contenu en acides gras n-3 à longue chaîne dans les membranes musculaires à la teneur observée dans la présente étude a antérieurement augmenté le signal de l'insuline envoyé aux muscles (Gingras *et al.*, 2007). Cette augmentation des signaux musculaires de l'insuline augmentait l'utilisation des acides aminés pour la synthèse (fabrication) de protéines corporelles contrôlées par l'insuline (Gingras *et al.*, 2007).

Les variations dans les teneurs des acides gras n-3 et n-6 observées dans la présente étude surviennent sans changement de la teneur en acides gras saturés, comme observé chez d'autres animaux antérieurement (MacDonald & Sprecher, 1991; Simopoulos, 1991; Ponnampalam *et al.*, 2001; Bergeron *et al.*, 2007). Cependant, certaines études montrent une diminution du degré de saturation des phospholipides membranaires lorsque de l'huile de poisson était incorporée à la diète (Otten *et al.*, 1997; Cooper *et al.*, 2004; Noci *et al.*, 2007). La hausse du degré de saturation des phospholipides pourrait réduire la fluidité des membranes, ce qui pourrait avoir des conséquences négatives sur les fonctions cellulaires. Or, la quantité d'acides gras saturés dans les membranes musculaires des porcs apparaît hautement contrôlée comme observé antérieurement (Ponnampalam *et al.*, 2001; Bergeron *et al.*, 2007). Ceci est suggéré par une teneur moyenne en acides gras saturés 2,5 fois plus élevée dans les triglycérides que dans les phospholipides membranaires des muscles des porcs à 55 et 85 kg recevant 3 et 4 % d'huile de menhaden.

Conclusions liées à l'objectif spécifique 2:

- *Le supplément en huile de menhaden a augmenté substantiellement la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne dans les membranes des muscles.*
- *Cette augmentation des n-3 à longue chaîne s'accompagne d'une réduction des acides gras n-6, ce qui est connu dans la littérature médicale pour être un phénomène combiné qui s'associe à l'amélioration de la sensibilité corporelle à l'insuline.*
- *Bien que non influencée par les traitements, la teneur en acides gras saturés des membranes serait hautement régulée chez le porc avec des concentrations 2,5 fois plus élevées dans les triglycérides que dans les phospholipides.*

Objectif spécifique 3 : *Établir si les effets de l'huile de menhaden sur l'utilisation corporelle des nutriments sont concomitants à une amélioration de la sensibilité à l'insuline et qui est estimée par l'utilisation d'indices sanguins mesurés à jeun tels que l'insuline, le glucose, l'urée et les acides aminés.*

La résistance à l'insuline a progressé avec l'âge chez les porcs entre 55 et 85 kg dans la présente étude avec une augmentation de la concentration d'insuline à jeun de 31 %. Ce phénomène est bien connu chez l'humain (Cohn *et al.*, 1980; *al.*, 1996; Meneilly & Elahi, 2005). Les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden ont eu tendance à diminuer quadratiquement la concentration de l'insuline à jeun chez les porcs à 85 kg, ce qui est consistant avec une amélioration potentielle de la sensibilité corporelle à l'insuline. Les concentrations en insuline ont été presque réduites aux concentrations témoin des porcs à 55 kg. Les animaux offrant peu de résistance à l'insuline due à leur jeune âge à un poids de 85 kg ne laissaient qu'une petite résistance à l'insuline qui pouvait être améliorée à un poids de 85 kg. L'alimentation d'huile de poisson a antérieurement réduit le pic d'insuline plasmatique induit par l'alimentation chez des agneaux, des porcelets, ou chez des vaches tarées non gestantes traitées avec des acides gras n-3 à courtes chaînes (Ponnampalam *et al.*, 2001; Bergeron *et al.*, 2007; Pires *et al.*, 2007). La résistance corporelle à l'action de l'insuline est mesurée plus sensiblement dans un état stimulé avec l'insuline (état alimenté) parce que c'est l'utilisation corporelle des nutriments dans ces conditions qui est fortement altérée par la maturité/l'âge (Davis *et al.*, 1996; Eisemann *et al.*, 1997; Thivierge *et al.*, 2008). L'utilisation des paramètres sanguins au jeûne pour détecter une amélioration de la résistance à l'insuline, comme dans la présente étude, était moins susceptible de montrer les effets des traitements. Ceci avait été démontré antérieurement chez des porcelets nouveaux nés à jeun et alimentés (Davis *et al.*, 1996; Thivierge *et al.*, 2008). Les concentrations de certains acides aminés au jeûne étaient réduites ou tendaient à être réduites de façon dose-dépendante par les apports alimentaires d'huile de menhaden, que ce soit à 55 ou 85 kg de poids vif. Ces observations sont compatibles avec des observations antérieures où plusieurs acides aminés plasmiques étaient réduits d'une manière dose-dépendante chez des bouillons dans un stade alimenté (donc un stade stimulé à l'insuline) (Fortin *et al.*, 2009). Le fait que les paramètres sanguins ont été mesurés à jeun a réduit la possibilité de voir nettement les effets des traitements. Cette décision méthodologique avait été prise pour réduire la variation dans ces mesures, car il n'était pas possible d'alimenter les 78 porcs aux deux heures pour maintenir un état nutritionnel stable comme pratiqué traditionnellement dans ce genre de mesure.

De façon similaire aux paramètres sanguins, les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden n'ont pas réduit la consommation alimentaire entre 30 et 55 kg de poids vif, mais plus tard, elle tendait à diminuer dans l'intervalle 55-85 kg selon la dose appliquée. Ceci s'est répercuté en une diminution de la protéine brute ingérée à 85 kg. Un effet similaire sur le gain moyen quotidien a aussi été mesuré à 85 kg. La diminution du gain moyen quotidien, qui est une conséquence de l'abaissement de l'ingestion des nutriments protéiques et en partie de

l'énergie, survient sans toutefois modifier la conversion alimentaire des porcs. Lors d'expérimentations antérieures, il a été observé qu'une réduction de la consommation, associée ou non à un changement de gain moyen quotidien ou à une amélioration de la conversion alimentaire, accompagnait l'alimentation supplémentée en huile de poisson. Dans ces études, les teneurs des phospholipides membranaires en acides gras n-3 à longue chaîne étaient à 10,7% des acides gras totaux, ou bien leur teneur atteignait 3 à 4,7 % des lipides totaux du muscle (Leskanich *et al.*, 1997; Wachira *et al.*, 2002; Cooper *et al.*, 2004). Il n'y a aucun changement dans les performances lorsque la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne des phospholipides du muscle est sous la barre des 5,5 %, ou lorsque leur teneur représente moins de 2,5 % des lipides totaux du muscle (Hsu *et al.*, 2004; Noci *et al.*, 2007; Jaturasitha *et al.*, 2009). Ces observations soutiennent qu'il y a potentiellement une régulation par l'huile de menhaden sur la consommation de nutriments qui est dépendante de la dose supplémentée et de la quantité incorporée dans les lipides corporels. Cette réduction de l'ingéré, qui survient tardivement à 85 kg de poids plutôt qu'à 55 kg dans la présente étude, suggère que la régulation est en partie métabolique et qu'elle n'est pas liée à la palatabilité des aliments. Cette hypothèse concorde avec les résultats d'autres études où la consommation alimentaire des bovins avait tendance à diminuer de 4 à 10 % lorsque de l'huile de menhaden était administrée directement dans la caillette (Gingras *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009). Par contre, il ne peut pas être exclu que la concentration en énergie digestible élevée (+107-109 % des besoins relativement à 3 400 kcal/kg) ait contribué à la diminution d'ingestion de la ration et de ses nutriments.

Conclusions liées à l'objectif spécifique 3:

- *Les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden tendent à réduire la concentration plasmatique de l'insuline à jeun en diminuant cette dernière de 31 % chez les porcs de 85 kg, près des niveaux de base observés chez les porcs de 55 kg.*
- *Les réductions observées dans les concentrations de certains acides aminés à jeun sont parallèles aux apports alimentaires croissants d'huile de menhaden.*
 - *Ces deux premiers changements pourraient être compatibles avec une amélioration de la sensibilité corporelle à l'insuline chez les porcs à 85 kg.*
- *Une réduction des nutriments ingérés, particulièrement la protéine, accompagnée d'une tendance pour une diminution de l'énergie ingérée lorsque les porcs pèsent 85 kg est observée. Ceci est accompagné d'une chute de gain et d'une conversion alimentaire maintenue.*

Objectif spécifique 4: *Établir si les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden améliorent la synthèse (fabrication) des protéines corporelles qui se traduit en une déposition accrue de muscle en mesurant l'épaisseur de la longe tout au long de la croissance en utilisant un appareil à ultrasons.*

L'augmentation de l'épaisseur du muscle de la longe chez les porcs de 85 kg montre pour la première fois qu'un enrichissement important des phospholipides membranaires de la longe en acides gras n-3 à longue chaîne peut se traduire en une déposition musculaire accrue. Il avait été montré lors d'études fondamentales antérieures que des enrichissements similaires des membranes des muscles en acides gras n-3 à longue chaîne augmentaient le taux d'utilisation corporelle des protéines contrôlées par l'insuline (Bergeron *et al.*, 2007; Gingras *et al.*, 2007; Fortin *et al.*, 2009). L'accroissement de l'épaisseur de la longe avec des teneurs similaires en n-3 à longue chaîne dans les phospholipides de muscle de la présente étude fournit un appui à ces études fondamentales sur le rôle des n-3 à longue chaîne dans le contrôle de la sensibilité à l'insuline qui favoriserait un dépôt accru de muscle. Le fait que cet accroissement de l'épaisseur de muscle à 85 kg survient dans la même période que la baisse des concentrations en insuline et de certains acides aminés est aussi cohérent avec une amélioration de la sensibilité à

l'insuline contrôlant l'utilisation corporelle de la protéine. De plus, les réductions des consommations de protéine et d'énergie associées à la baisse du gain quotidien, mais combinées à une épaisseur de la longe augmentée, appuient la supposition que la protéine alimentaire aurait été davantage acheminée vers des voies pour déposer du muscle. Le délai avant de pouvoir détecter des changements au niveau de la longe entre 55 et 85 kg met en évidence qu'une période de temps était requise pour que la régulation survienne et qu'elle se traduise en des changements détectables au niveau de l'épaisseur de la longe. La déposition de muscle peut avoir été augmentée en réduisant la dégradation des protéines et/ou en promouvant ou non la synthèse (fabrication) des protéines corporelles. Ces deux voies de contrôle pourraient potentiellement être responsables de ces réponses (Bergeron *et al.*, 2007; Gingras *et al.*, 2007; Khal & Tisdale, 2008). De façon compatible avec la présente étude, une récente publication montre que l'addition d'huile de poisson au régime des truies gestantes a augmenté le poids des porcelets à la naissance et leur gain de poids subséquents (Mateo *et al.*, 2009). Dans cette même étude, la hausse de la protéine alimentaire, à elle seule, n'avait aucun effet sur les performances des porcelets. La recherche actuelle met en lumière le rôle des acides gras n-3 à longue chaîne des phospholipides membranaires des muscles dans la régulation de la déposition des protéines corporelles. Ceci n'exclut pas le fait que les acides gras n-3 à courtes chaînes, principalement le C18:3 n-3, auraient augmenté la masse musculaire des porcs (Huang *et al.*, 2008). Par contre, le mécanisme derrière cette régulation des n-3 à courtes chaînes serait plutôt inconnu.

Dans l'essai actuel, l'addition d'huile de menhaden à la ration des porcs n'affecte pas l'épaisseur de gras dorsal, qu'ils pèsent 55 ou 85 kg. Inversement, l'huile de poisson incorporée au régime des agneaux a réduit le gras dorsal ou le gras intramusculaire (Ponnampalam *et al.*, 2001). Une addition alimentaire de C22:6 n-3, qui augmentait la teneur en C22:6 n-3 à 2,4 % du gras total des muscles de porcs en croissance, a augmenté l'activité d'un enzyme (un agent de contrôle) responsable d'oxyder (ou de brûler) le gras dans les cellules (Hsu *et al.*, 2004). Ceci pourrait expliquer la réduction potentielle du dépôt de gras chez des porcs recevant du C22:6 n-3. Ce rôle que joue le C22:6 n-3, en lien avec le déclin de la masse grasseuse, soulève l'aspect des rôles potentiels respectifs du C20:5 n-3 et du C22:6 n-3 dans l'organisme. Chez les rongeurs, le rôle du C22:6 n-3 à réduire le gras corporel a été beaucoup étudié (Fink *et al.*, 1983; Ruzickova *et al.*, 2004; Flachs *et al.*, 2006; Tsuzukia *et al.*, 2006; Flachs *et al.*, 2009). La somme des acides gras individuels n-3 à longue chaîne dans les membranes de la longe en relation avec l'indice calculé de la surface de la longe corrigée pour le poids vif montrent une relation consistante entre ces paramètres. Le C20:5 n-3 était de 2 à 2,3 fois plus élevé que le C22:6 n-3 dans les phospholipides membranaires de la longe. Cette différence de teneur entre ces deux acides gras a été étudiée en relation avec l'épaisseur de la longe pour évaluer si l'un des deux acides gras était davantage associé à cette réponse.

L'augmentation du C20:5 n-3 dans les phospholipides membranaires serait associée à l'amélioration de la sensibilité corporelle à l'insuline et réduirait la dégradation et la mobilisation des protéines musculaires chez des modèles rongeurs (Mori *et al.*, 1997; Mori *et al.*, 1999; Nobukata *et al.*, 2000; Minami *et al.*, 2002; Khal & Tisdale, 2008; Ryu *et al.*, 2009). Pour sa part, le C22:6 n-3 est plutôt connu pour son rôle minceur à réduire le gras corporel (Fink *et al.*, 1983; Ruzickova *et al.*, 2004; Flachs *et al.*, 2006; Tsuzukia *et al.*, 2006; Flachs *et al.*, 2009). L'exploration actuelle des données ne permet pas de distinguer clairement un rôle particulier pour le C20:5 n-3 dans les membranes qui est différent du C22:6 n-3. Ainsi, les données de la présente étude supportent le fait que la somme des acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides membranaires des muscles jouerait un rôle dans cette régulation. En raison d'un effet confondant par la présence concomitante du C20:5 n-3 et du C22:6 n-3 par l'apport d'huile de menhaden, d'autres recherches seront requises pour établir si l'un de ces deux acides gras est étroitement responsable de l'amélioration de la déposition protéique musculaire.

Conclusions liées à l'objectif spécifique 4:

- *Les apports alimentaires croissants d'huile de menhaden ont augmenté l'épaisseur de la longe de façon quadratique chez les porcs à 85 kg, avec l'épaisseur de longe la plus grande associée à la teneur alimentaire en n-3 à longue chaîne la plus élevée, soit 4 %.*
 - *Le C20:5 n-3 et le C22:6 n-3 semblent tous deux importants dans cette réponse.*

Objectif secondaire 4a : *Définir si la composition en acides gras des phospholipides membranaires de la longe s'associe à celle des globules rouges du sang et si ces derniers pourraient être utilisés comme outils estimant la composition des membranes des muscles.*

Les phospholipides des globules rouges du sang, mesurés dans l'étude actuelle, pourraient être utilisés comme un indice de la composition en acides gras des membranes musculaires. L'utilisation de ceux-ci est une approche beaucoup plus simple que la pratique de biopsies musculaires. Un modèle de régression linéaire montre une relation étroite entre ces deux paramètres avec un r^2 de 0,95. La pente de la relation est de 1,80, ce qui signifie que pour chaque unité de pourcentage d'acides gras n-3 à longue chaîne dans les phospholipides des globules rouges, les membranes musculaires contiennent 1,8 fois cette quantité. Les globules rouges et l'indice calculé de la surface de la longe corrigé pour le poids sont deux paramètres qui sont aussi liés. Ceci signifie que cette dernière variable pourrait servir d'indice estimant la composition en acides gras des membranes musculaires et pourrait être un indicateur de l'épaisseur de la longe. Par contre, la figure 7A met en évidence le fait que le seuil de la teneur maximale en acides gras n-3 à longue chaîne pourrait être atteint plus rapidement dans les globules rouges que dans les membranes des muscles. Ceci signifie que lorsque les phospholipides des globules rouges contiennent 8-9 % des acides gras totaux sous forme d'acides gras n-3 à longue chaîne, leur teneur semble atteindre un plateau alors que les membranes musculaires s'enrichissent à un taux supérieur. Conséquemment, un modèle de régression pourrait être imprécis lorsque des acides gras n-3 à longue chaîne continuent d'être supplémentés une fois que les membranes des globules rouges ont atteint une teneur de 7-8 % en n-3 à longue chaîne.

Conclusions liées à l'objectif spécifique secondaire 4a :

- *La teneur en acides gras n-3 à longue chaîne des globules rouges du sang pourrait être utilisée pour prédire celle des muscles. Par contre, dès que leur teneur en n-3 à longue chaîne dépasse 8 %, il faudrait être prudent dans la prédiction de la teneur en n-3 à longue chaîne dans les membranes des muscles.*
 - *La teneur en acides gras des globules rouges du sang pourrait aussi servir d'indice pour prédire l'épaisseur de la longe.*

Expérience 2 – Période de finition témoin pour tous les porcs

Objectif spécifique 5: *Investiguer si les effets du préconditionnement des lipides corporels, avec les apports d'huile de menhaden lors des périodes de début et de croissance, persistent lors de la finition où une ration de témoin est servie. Cet objectif est réalisé en mesurant les performances des porcs, les épaisseurs de la longe, de gras dorsal et les caractéristiques de la carcasse.*

Peu importe le préconditionnement alimentaire à l'huile de menhaden reçu durant la période de 30 à 85 kg, les porcs en finition recevant une ration témoin montrent tous une consommation alimentaire, un gain moyen quotidien et une conversion alimentaire similaires. L'augmentation de l'épaisseur de la longe durant la croissance, observée avec l'addition d'huile de menhaden à la ration régime des porcs, est encore effective à 100 kg de poids vif, mais à une amplitude moindre. Les résultats montrent aussi qu'à 100 kg de poids, l'indice calculé de la surface de la

longe corrigé pour le poids est lié au poids entre les porcs, ce qui contraste avec les données à 85 kg. Des effets confondants sont observés durant la phase de finition à cause du retrait alimentaire de l'huile de menhaden. En effet, l'appauvrissement des membranes en acides gras n-3 à longue chaîne simultanément à une augmentation en n-6 rendent cette observation complexe puisque ce phénomène est combiné à des altérations métaboliques associées au retrait alimentaire de l'huile de menhaden. L'étude actuelle ne permet pas de savoir s'il y a eu une mobilisation de la protéine de la longe ou s'il y a eu un ralentissement du taux de croissance de la longe pour expliquer la présente observation.

Quoique les porcs recevant des apports croissants d'huile de menhaden aient montré un ralentissement modéré du taux de croissance durant les périodes antérieures (30-85 kg), ce léger retard fut rattrapé en finition. Leur poids similaire à 115 kg témoigne d'un gain compensatoire durant la période de 85 à 115 kg, qui a aussi corrigé la composition de la carcasse. Une amélioration de l'efficacité métabolique de ces porcs peut expliquer un gain compensatoire, étant donné la consommation alimentaire qui est similaire entre les porcs (Zimmerman & Khajarearn, 1973; Valaja *et al.*, 1991). Par contre, la conversion alimentaire globale de la période de finition couvrant 85 à 115 kg est demeurée similaire. Une observation similaire a été faite antérieurement (Fabian *et al.*, 2002). Au poids moyen de 115 kg, les épaisseurs de muscle dans les carcasses ont été mesurées avec un appareil Destron à l'abattoir. Peu importe le préconditionnement alimentaire antérieur, les épaisseurs de muscle sont semblables à 115 kg. Ces observations contrastent avec celles mesurées à 100 kg sur les animaux vivants où la mesure de ce paramètre avait été effectuée avec un appareil à ultrasons. Cette différence entre la mesure prise sur l'animal vivant à 100 kg et celle effectuée sur la carcasse à 115 kg pourrait être attribuable aux équipements employés qui ne sont pas les mêmes. De plus, les mesures Destron seraient moins précises que celles des ultrasons (Pomar & Marcoux, 2005). Cette différence peut aussi être due à une progression de la perte de la longe associée au retrait de l'huile de menhaden de l'alimentation. En raison que ces deux mesures impliquent, l'utilisation de deux technologies, la comparaison entre ces deux mesures à 100 et 115 kg devient difficile. Or, nous pouvons affirmer que l'avantage obtenu sur l'épaisseur de la longe mesurée à 85 et 100 kg est devenu indétectable à 115 kg.

Composition lipidique du tissu grasseux et indice nutritionnel de la longe. La composition en lipides du muscle et du gras dorsal à 100 kg donne un aperçu intéressant de la dynamique des acides gras entre les lipides de structures et ceux entreposés. La comparaison entre la composition lipidique juste avant l'abattage et celle à 85 kg montre qu'un laps de temps est nécessaire avant que les lipides corporels s'appauvrissent en acides gras n-3. À 100 kg, les phospholipides, les triglycérides et le gras sous-cutané dorsal ont une composition similaire en acides gras saturés et mono-insaturés alors que les acides gras n-3 et n-6 varient beaucoup entre les fractions lipidiques. Le contenu en acides gras n-3 à longue chaîne des phospholipides membranaires de la longe est réduit de -15 % durant la période d'appauvrissement de finition et de -22 % dans les triglycérides tandis que les acides gras n-6 augmentent de +6 % dans les phospholipides.

La valeur globale nutritionnelle de la longe est fortement améliorée lorsque l'on compare les données de la présente étude aux normes de Santé Canada et à celles de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS). La montée croissante des maladies cardiovasculaires dans le monde entier et de la prévalence du diabète combinée à l'obésité ont amené à l'attention de la population générale l'importance de manger plus sainement. L'OMS a fait des recommandations quant à la fraction de l'énergie ingérée quotidiennement qui devrait être représentée par le gras alimentaire. L'OMS a aussi établi la fraction de l'énergie ingérée qui devrait être représentée par les fractions de lipides. Les porcs de l'étude actuelle proviennent de lignées sélectionnées pour l'obtention d'une viande maigre. D'ailleurs, l'épaisseur de gras

moyen oscille autour de 18-19 mm et le contenu en gras de la longe sans le gras visible est de 1,6 g/100 g. Le gras de la longe des porcs contient en moyenne 40 % d'acides gras saturés et 40 % de mono-insaturés. Cette longe expérimentale fournit une fraction de l'énergie ingérée provenant des gras saturés et mono-insaturés inférieurs à 10 et 12 %, respectivement (en considérant une portion standard de porc de 75 g qui fournit 200 kcal; selon Santé Canada). La teneur moyenne en acides gras n-6 dans les porcs standards canadiens est élevée en raison de leur type d'alimentation riche en céréales. Le mélange d'huile témoin (30 % olive, 37 % palme et 33 % noix de coco) utilisé dans la présente étude avait un profil similaire à celui du gras de porc (NRC, 1998) pour ne pas modifier le profil des porcs alimentés avec les traitements témoins. L'alimentation avec l'huile de menhaden a augmenté fortement les acides gras n-3 totaux dans la longe des porcs et cette augmentation est couverte en majorité par les n-3 à longue chaîne. Ces derniers sont reconnus comme étant des acides gras actifs exerçant des effets bénéfiques pour la santé humaine par l'OMS. La substitution du gras témoin pour l'huile de menhaden a réduit largement le rapport n-6 : n-3 de 17 à 2, lequel est à l'intérieur du rapport idéal recommandé par l'OMS variant de 1 à 5. La longe des porcs alimentés avec l'huile de menhaden fournit 5,6 % du gras total sous forme d'acides gras n-3 dont 5,1 % sont des acides gras n-3 à longue chaîne. L'ingestion quotidienne d'acides gras n-3 à longue chaîne devrait être de 400 mg/jour (OMS), ou jusqu'à 3 000 mg/jour pour des gens qui souffrent de problème de lipides sanguins (American Heart Association) ou entre 100 et 3 000 mg par jour selon Santé Canada. Une portion moyenne de 75 g de longe de porc de la présente étude traitée avec 4 % d'huile de menhaden, et qui contient 1600 mg d'acides gras totaux/100 g de longe fournirait 71 mg d'acides gras n-3 à longue chaîne par portion. Ceci représenterait 18 % de la recommandation minimale/idéale quotidienne de 400 mg/j. La présente étude est un exemple typique des possibilités pour améliorer la teneur en acides gras n-3 à longue chaîne de la viande de porc pour atteindre des cibles prisées par des organismes nationaux et internationaux pour la santé des citoyens.

Conclusions liées à l'objectif spécifique 5:

- *Le préconditionnement des lipides corporels en acides gras n-3 à longue chaîne lors de la période de 30-85 kg n'a aucun effet sur les performances des porcs entre 85 et 115 kg alors qu'ils sont tous sur une ration témoin de finition.*
- *L'augmentation de l'épaisseur de la longe est toujours détectable lorsque les porcs pèsent 100 kg, mais le gain en dépôt de muscle est moindre à 100 kg qu'à 85 kg.*
 - *soit que le mécanisme de dégradation des protéines potentiellement réduit avec les n-3 à longue chaîne (selon la littérature) serait réaugmenté lors que l'huile de poisson serait retirée de l'alimentation;*
 - *soit que le taux de synthèse des protéines aurait été ralenti.*
- *L'étude actuelle ne permet pas de discerner le mécanisme responsable de cette réponse.*
- *Les carcasses sont similaires entre tous les porcs, malgré la réduction modérée du gain moyen quotidien observée chez les porcs entre 55 et 85 kg recevant l'huile de menhaden. Ceci suggère que les porcs ont expérimenté un gain compensatoire.*
- *Les apports alimentaires de 3 ou 4 % d'huile de menhaden procurent à la longe des porcs une plus-value nutritionnelle et une composition en acides gras n-3 à longue chaîne enviable pour la santé humaine.*

Expérience 3 – Essai sur la conservation des aliments expérimentaux riches en acides gras n-3 à longue chaîne

Objectif spécifique 6: *Mesurer la qualité des huiles et des gras des aliments expérimentaux entreposés dans des silos aux fins de l'expérimentation en utilisant la mesure d'indice de peroxydation*

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Entreposage et oxydation des matières grasses

Lors de la fabrication des aliments, et tout au long de l'expérience, la qualité et la conservation des huiles et des aliments expérimentaux ont été continuellement enregistrées chaque semaine. Un indice de peroxydation mesure la quantité d'ions de peroxyde d'hydrogène dans un produit consécutif à son état d'oxydation, en milliéquivalent d'oxygène par kilogramme de produit. L'unité d'un indice de peroxydation ($\text{mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$) mesure la quantité d'oxygène contenue dans une molécule de peroxyde d'hydrogène par kilogramme d'huile. Plus la valeur de l'indice de peroxydation est élevée, plus les acides gras polyinsaturés sont dans un état dégradé par le processus d'oxydation.

Les huiles utilisées dans les rations expérimentales (palme, coco, olive, menhaden) montraient une grande qualité avec des valeurs d'indice de peroxydation $\leq 6,5 \text{ mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ (données non présentées). Le mélange témoin dosait $<4,0 \text{ mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ lors des fabrications des aliments de début et de croissance (figure 8). L'huile de menhaden présentait un indice de peroxydation $<1,5 \text{ mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ avant la fabrication des aliments (figure 8). Toutes les mesures ont été prises pour préserver la qualité des huiles. Les approches suivies ont permis d'obtenir des huiles expérimentales de grande qualité. Les huiles ont été entreposées en l'absence de lumière, au froid (4°C) et de l'azote a été injecté dans les réservoirs d'entreposage et dans ceux transportés à la meunerie.

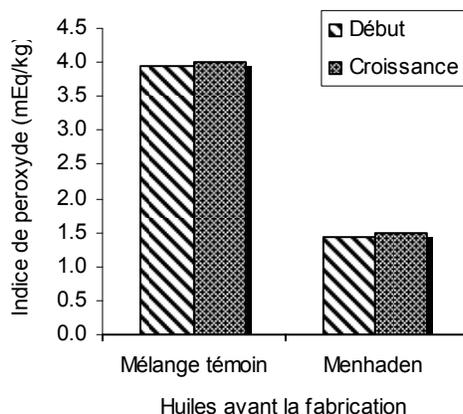


Figure 8 : Indice d'oxydation des huiles juste avant la fabrication des aliments de début et de croissance

Le jour 1 suivant les fabrications, les indices de peroxyde avaient augmenté un peu pour les aliments contenant l'huile de menhaden alors que le degré d'oxydation des aliments témoin est demeuré stable ($3,99$ et $3,40 \text{ mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$; début et croissance; figures 9 et 10). Pour les aliments de début contenant 3 et 4 % d'huile de menhaden, l'indice de peroxyde a augmenté jusqu'à $3,8$ et $4,0 \text{ mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivement, immédiatement après la fabrication. Pour sa part, l'huile de menhaden avait un degré d'oxydation qui oscillait autour de $1,4$ et $1,5 \text{ mEq O}_2\cdot\text{kg}^{-1}$ au moment de la fabrication des aliments (figure 9).

Le scénario est le même pour les aliments de croissance 3 et 4 %, les indices de peroxyde ont augmenté jusqu'à 3,5 et 3,6 mEq O₂·kg⁻¹, le jour suivant la fabrication des aliments, respectivement (figure 10). L'huile de menhaden contient une concentration élevée d'acides gras polyinsaturés à longue chaîne, ce qui la rend plus vulnérable à l'oxydation que le mélange d'huile témoin utilisé. La chaleur, la lumière et l'oxygène peuvent altérer les huiles insaturées. D'ailleurs, lors des fabrications, les aliments ont été soumis à la chaleur lors de la mise en comprimé qui s'effectue de façon courante à des températures élevées (~70-80 °C). Cet aspect est un facteur qui a contribué à augmenter un peu l'indice de peroxyde de l'huile de menhaden. Quoiqu'on observe une augmentation de l'indice de peroxyde des aliments contenant l'huile de menhaden après la fabrication, les valeurs observées sont tout de même très acceptables. Leurs indices de peroxydation se situent bien en dessous du seuil de 25-50 mEq O₂·kg⁻¹ pour des huiles considérées oxydées (Hoffman, 1962).

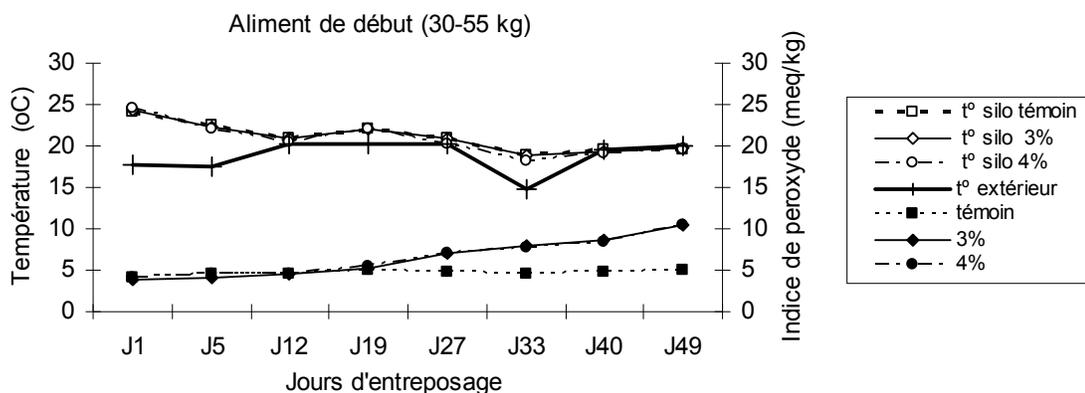


Figure 9 : Évolution du degré d'oxydation des matières grasses contenues dans les aliments expérimentaux de début et variation de la température dans les silos tout au long de l'entreposage

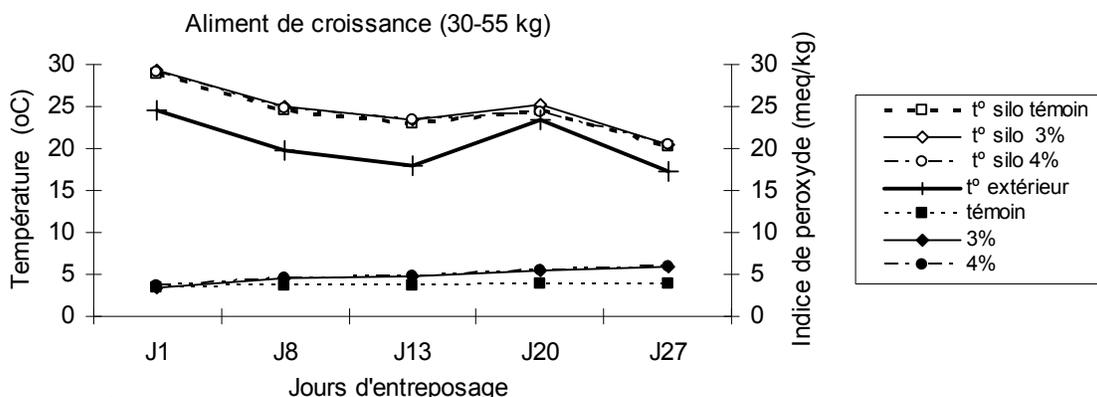


Figure 10 : Évolution du degré d'oxydation des matières grasses contenues dans les aliments expérimentaux de croissance et variation de la température dans les silos tout au long de l'entreposage.

L'entreposage des aliments s'est fait durant la période chaude de l'été; entre les mois de mai et d'août. Durant cette période, nous avons enregistré une augmentation graduelle du degré d'oxydation des matières grasses contenues dans les aliments des porcs (figures 9 et 10). En effet, cette hausse est particulièrement visible pour les aliments de début et de croissance contenant l'huile de menhaden. Du jour 1 jusqu'au jour 49 d'entreposage, l'indice de peroxyde des aliments de début 3 et 4 % est passé de 3,8 à 10,5 mEq O₂·kg⁻¹, respectivement (figure 9). Cette augmentation est également apparente pour les aliments de croissance puisque l'indice de peroxyde des aliments 3 et 4%, qui était de 3,5 et 3,6 mEq O₂·kg⁻¹ au jour 1 d'entreposage a augmenté jusqu'à 6,0 mEq O₂·kg⁻¹ après 27 jours (figure 10). D'après ces résultats, on peut considérer qu'une durée de 49 jours d'entreposage, pour des aliments contenant 3 et 4 % d'huile de menhaden, est acceptable puisque le degré d'oxydation est bien en dessous du seuil critique de 25-50 mEq O₂·kg⁻¹ lorsque l'entreposage s'effectue à des températures variant entre 18,3 et 24,4 C. Quoique les températures dans les silos aient augmenté davantage pour les aliments de croissance (20,3 à 29,4 °C), les indices de peroxyde sont demeurés acceptables après 27 jours d'entreposage (figures 9 et 10). Des indices de peroxydation étaient demeurés stables lorsque de l'huile de menhaden avait été ajoutée à la ration offerte sous forme de comprimés à des veaux de gain, dans une étude pilote conduite à l'Université Laval (données non publiées, Thivierge *et al.*). Les observations actuelles sont concordantes avec celles obtenues antérieurement. Donc, même si la majorité des producteurs de porcs n'entreposent pas aussi longtemps leurs aliments dans les silos, il devient ainsi plus rassurant pour eux d'envisager l'utilisation de cette huile de poisson fortement polyinsaturée ou de types d'acides gras n-3 à longue chaîne similaires.

Les aliments témoins sont demeurés assez stables durant l'entreposage malgré les petites variations de température observées dans les silos. L'indice de peroxyde de l'aliment témoin de début, qui était respectivement de 3,99 mEq O₂·kg⁻¹ au jour 1 de l'entreposage a grimpé jusqu'à 5,01 mEq O₂·kg⁻¹ après 49 jours d'entreposage. Quant à l'aliment témoin de croissance, qui indiquait initialement un indice de peroxyde de 3,40 mEq O₂·kg⁻¹, celui-ci démontrait une valeur de 3,85 mEq O₂·kg⁻¹ après 27 jours d'entreposage. Ceci démontre que le mélange d'huile employé (noix de coco, palme et olive) est peu sensible à l'oxydation, ce qui permet un entreposage de longue durée.

Pour ce qui est de l'aliment de finition, où seuls les céréales et les autres ingrédients de la ration fournissaient la matière grasse, un indice de peroxyde de 3,5 mEq O₂·kg⁻¹ en moyenne a été obtenu tout au long de l'entreposage (données non présentées).

CONCLUSION

Ainsi, il semble possible de proposer l'utilisation de l'huile de menhaden en meunerie malgré sa sensibilité à l'oxydation, à la chaleur et à la lumière. Dans cet essai, l'ajout de l'huile de menhaden directement au mélangeur et non pas en surface du comprimé, a probablement contribué à ralentir l'oxydation des matières grasses. En meunerie commerciale, lorsque la quantité de gras à ajouter à l'aliment doit être élevée, une partie de cette source de gras sera incorporée au mélangeur alors qu'une autre partie devra être à la surface du comprimé dans le but d'éviter l'obtention d'un comprimé friable.

- Dans le cas où l'huile de menhaden serait utilisée en meunerie commerciale, il pourrait être préférable de l'incorporer au mélangeur et non pas à la surface du comprimé. Si les quantités à incorporer devaient être élevées, l'utilisation d'un agent liant serait suggérée.
- Un peu de chaleur semble s'accumuler dans les silos puisqu'on constate de petites variations de température à l'intérieur des silos et elles sont supérieures à celles mesurées à l'extérieur (figures 9 et 10). Un fait important à considérer lors de l'entreposage d'aliments sensibles à la chaleur, la température peut avoir un effet sur la détérioration des matières grasses contenues dans les aliments. Par contre, les mesures actuelles ne suggèrent pas de problème si l'entreposage était de plus courte durée.
- L'aliment contenant de l'huile de poisson conservée sous forme de comprimés devrait être favorisé pour limiter l'oxydation, car il semble que le comprimé limite les dommages faits aux gras insaturés par la lumière, l'oxygène et la chaleur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

- À la lumière de cette première étude, les apports alimentaires croissants en huile de menhaden augmentent de manière dose-dépendante les acides n-3 à longue chaîne dans les membranes des muscles. Les teneurs les plus élevées en acides gras n-3 à longue chaîne sont obtenues avec le traitement de 4 % d'huile de menhaden, et elles ont atteint 15 % à 55 kg et 17,8 % à 85 kg. L'enrichissement des membranes des muscles en n-3 à longue chaîne est parallèle à la réduction de la teneur en acides gras n-6, qui est reconnue dans le milieu de la recherche médicale pour être un effet combiné à l'amélioration de la sensibilité à l'insuline.
- Les indices sanguins de la sensibilité à l'insuline combinés aux mesures de l'épaisseur de la longe, qui ont été modifiées durant la période de croissance 55-85 kg, sont compatibles avec une amélioration potentielle de la sensibilité à l'insuline contrôlant l'utilisation corporelle des protéines:
 1. Une tendance pour une réduction de l'insuline de même que certains acides aminés plasmatiques dans un stade au jeûne chez les porcs de 85 kg;
 2. Une augmentation de l'épaisseur de la longe;
 3. Des réductions d'ingestion de nutriments et de gains moyens quotidiens;

Ces observations soutiennent que les apports d'huile de menhaden ont amélioré la déposition de la protéine musculaire via potentiellement une amélioration de la sensibilité à l'insuline qui favorise les voies de construction de protéines des muscles.

- Les porcs ont été soumis à une ration témoin de finition entre 85 et 115 kg et ont eu des performances et des carcasses similaires en final. Potentiellement, un gain compensatoire est derrière ces réponses.
- Un essai sur la qualité du gras des aliments expérimentaux entreposés dans des silos a permis de conclure que l'huile de menhaden ajoutée à un taux maximum de 4% dans la ration montre une qualité de gras maintenue pour des entreposages de 27 à 49 jours. Par contre, il nous apparaît que cette conservation est due en partie par l'utilisation d'une moulée sous forme de comprimés qui ont minimisé le contact des acides gras insaturés avec l'oxygène, la lumière, et probablement la chaleur.

À la lumière de ces résultats, les apports alimentaires d'huile de menhaden (apportant de grandes quantités d'acides gras n-3 à longue chaîne) offrent potentiellement de nouvelles opportunités pour développer de nouvelles stratégies alimentaires pour le secteur porcin. Ce type de stratégie pourrait donner l'image d'être plus « naturelle » tout en favorisant les producteurs et leur produit. Cette recherche était un premier essai qui a permis de mettre des « blocs » de connaissances en place pour de futures investigations et développements. Nos suggestions à ce sujet sont présentées à la section suivante.

SUGGESTIONS POUR DES RECHERCHES FUTURES

Des recherches complémentaires seraient requises pour raffiner les méthodes pour incorporer les acides gras n-3 à longue chaîne, comme l'huile de menhaden ou des concentrés d'acides gras C20:5 n-3 et C22 :6 n-3, dans les régimes des porcs. À la lumière des résultats actuels et de nos travaux antérieurs, le futur but serait de produire un porcelet au stade de début qui posséderait un minimum de 15-17 % d'acides gras n-3 à longue chaîne dans les membranes des muscles. Cette quantité minimale a produit de façon consistante, entre les études antérieures, une amélioration de la sensibilité à l'insuline ou une amélioration de la fabrication des protéines, ou de déposition de muscle.

De cette manière, les performances des porcs pourraient bénéficier d'une activation des voies de construction de protéines corporelles augmentée durant les périodes de début et de croissance et même durant une partie de la finition. Les aspects méthodologiques suivants demanderaient de plus amples considérations:

1. Le régime alimentaire en n-3 à longue chaîne doit apporter au minimum des quantités équivalentes en acides n-3 à longue chaîne étudiées dans la présente étude.
2. Le régime alimentaire devrait fournir environ 102 à 103 % des concentrations en énergie recommandées en kcal/kg (observations non publiées; Thivierge *et al.*). Cette approche nous a permis antérieurement de maintenir les gains moyens quotidiens.

La recherche présente et les précédentes suggèrent que la concentration en énergie de la ration en kcal/kg ne doit pas excéder environ 103 % de la recommandation (observations non publiées; Thivierge *et al.*)

Ceci permet de limiter la réduction d'ingestion d'énergie par

- 1) la réduction de la consommation alimentaire engendrée avec l'alimentation d'huile de menhaden (particulièrement 4 % d'huile de menhaden par exemple);
 - 2) la limitation d'un effet additif dans la réduction de l'ingestion d'énergie. Ceci s'explique par la chute d'ingestion engendrée par l'huile de menhaden qui se combine à une trop grande concentration énergétique par kilogramme d'aliments (si la concentration en énergie de la diète $\geq 104-105$ %). Il apparaît qu'un tel phénomène a été observé dans la présente étude avec des teneurs en énergie digestible des rations à 107-108 % des kcal/kg recommandés.
3. Le contenu en protéines brutes des rations devrait fournir un excès de protéines pour couvrir au minimum la réduction d'ingestion engendrée par l'alimentation d'huile de menhaden. Nous suggérons un minimum 110 % des besoins jusqu'à ce que davantage de raffinement soit fait sur le sujet. Le but est d'éviter une limitation en acides aminés essentiels qui limiterait la déposition de muscle lors d'essais expérimentaux.
 4. Le temps requis pour retirer les acides gras n-3 à longue chaîne de l'alimentation des porcs avant l'abattage nécessiterait davantage d'investigations pour maximiser le bénéfice de l'alimentation d'acides n-3 à longue chaîne.
 5. Les données actuelles suggèrent que lorsque les acides gras n-3 à longue chaîne sont retirés des aliments, leur effet bénéfique au niveau sur la déposition de la protéine musculaire s'amointrit graduellement. Ceci mériterait d'être examiné davantage pour l'établissement des procédures alimentaires préabattages.

6. D'autres travaux seraient nécessaires afin d'établir si la diminution de la consommation alimentaire par l'apport alimentaire d'huile de menhaden peut se traduire en des économies pour le producteur par une réduction des coûts d'alimentation et une amélioration du revenu de la vente des porcs.
7. Des recherches sont publiées montrant le développement en cours de sources d'acides gras n-3 à longue chaîne d'origines autres que marines qui seraient produites par des levures et des champignons via les approches de biotechnologies. Il est donc probable que l'accès à ces acides gras ne soit pas limité par l'abondance future et réduite des poissons huileux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adams HR. (2001). *Veterinary pharmacology and therapeutics*. Iowa State University Press, Ames, IA, USA. al. Fe. (1996). *Diabetes*.

Allen E, Cassens RG & Bray RW. (1967). Comparative lipid composition of three porcine muscles. *J Anim Sci* 26, 36-40.

Ashes JR, Siebert BD, Gulati SK, Cuthbertson AZ & Scott TW. (1992). Incorporation of n-3 fatty acids of fish oil into tissue and serum lipids of ruminants. *Lipids* 27, 629-631.

Bergeron K, Julien P, Davis TA, Myre A & Thivierge MC. (2007). Long-chain n-3 fatty acids enhance neonatal insulin-regulated protein metabolism in piglets by differentially altering muscle lipid composition. *J Lipid Res* 48, 2396-2410.

Chapman RA & Mackay K. (1949). The estimation of peroxides in fats and oils by the ferric thiocyanate method. *Journal of American Oil Chemists Society* 26, 321-325.

Cohn SH, Vartsky D, Yasumura S, Sawitsky A, Zanzi I, Vaswani A & Ellis KJ. (1980). Compartmental body composition based on total-body nitrogen, potassium, and calcium. *Am J Physiol (Endocrinol Metab)* 239, E524-E530.

Cooper SL, Sinclair LA, Wilkinson RG, Hallett KG, Enser M & Wood JD. (2004). Manipulation of the n-3 polyunsaturated fatty acid content of muscle and adipose tissue in lambs. *J Anim Sci* 82, 1461-1470.

Counil E, Julien P, Lamarche B, Chateau-Degat M-L, Ferland A & Dewailly E. (2009). Association between trans-fatty acids in erythrocytes and pro-atherogenic lipid profiles among Canadian Inuit of Nunavik: possible influences of sex and age. *British Journal Nutrition*, 1-11/doi:10.1017/S0007114509297182.

Davis TA, Burrin DG, Fiorotto ML & Nguyen HV. (1996). Protein synthesis in skeletal muscle and jejunum is more responsive to feeding in 7- than in 26-day-old pigs. *Am J Physiol (Endocrinol Metab)* 270, E802-E809.

Davis TA, Suryawan A, Bush JA, O'Connor PMJ & Thivierge MC. (2003). Interaction of amino acids and hormones in the regulation of protein metabolism in growing animals. *Canadian Journal of Animal Science* 83, 353-364.

Eisemann JH, Catherman DR & Huntington GB. (1994). Comparison of insulin infusion sites on metabolite net flux and insulin kinetics in growing euglycemic beef steers. *J Anim Sci* 72, 990-997.

Eisemann JH, Huntington GB & Catherman DR. (1997). Insulin sensitivity and responsiveness of portal-drained viscera, liver, hindquarters, and whole body of beef steers weighing 275 or 490 kilograms. *J Anim Sci* 75, 2084-2091.

Else PL & Hulbert AJ. (2003). Membranes as metabolic pacemakers. *Clinical Experimental Pharmacology and Physiology* 30, 559-564.

Fabian J, Chiba LI, Kuhlert DL, Frobish LT, Nadarajah K, Kerth CR, McElhenney WH & Lewis AJ. (2002). Degree of amino acid restrictions during the grower phase and compensatory growth in pigs selected for lean growth efficiency. *J Anim Sci* 80, 2610-2618.

Fink RI, Kolterman OG, Griffin J & Olefsky JM. (1983). Mechanisms of insulin resistance in aging. *J Clin Invest* 71, 1523-1235.

Flachs P, Mohamed-Ali V, Horakova O, Rossmeisl M, Hosseinzadeh-Attar MJ, Hensler M, Ruzickova J & Kopecky J. (2006). Polyunsaturated fatty acids of marine origin induce adiponectin in mice fed a high-fat diet. *Diabetologia* 49, 394-397.

Flachs P, Rossmeisl M, Bryhn M & Kopecky J. (2009). Cellular and molecular effects of n-3 polyunsaturated fatty acids on adipose tissue biology and metabolism. *Clin Sci* 116, 1-16.

Fortin M, Julien P, Couture Y, Dubreuil P, Chouinard PY, Latulippe C, Davis TA & Thivierge MC. (2009). Regulation of glucose and protein metabolism in growing steers by long-chain n-3 fatty acids in muscle membrane phospholipids is dose-dependent. *Animal* in press, ANIMAL-09-20201.

Gingras AA, White PJ, Chouinard PY, Julien P, Davis TA, Dombroski L, Couture Y, Dubreuil P, Myre A, Bergeron K, Marette A & Thivierge MC. (2007). Long-chain omega-3 fatty acids regulate whole-body protein metabolism by promoting muscle insulin signaling to the Akt-mTOR-S6K1 pathway and insulin sensitivity. *J Physiol (London)* 579, 269-284.

Hoffman G. (1962). Vegetable oils. In *Symposium of food: Lipids and their oxidation*, ed. Schultz HW. AVI Publishing Company inc., Westport, CT.

Hsu JM, Wang PH, Liu BH & Ding ST. (2004). The effect of dietary docosahexaenoic acid on the expression of porcine lipid metabolism-related genes. *J Anim Sci* 82, 683-689.

Huang FR, Zhan ZP, Luo J, Liu ZX & Peng J. (2008). Duration of dietary linseed feeding affects the intramuscular fat, muscle mass and fatty acid composition in pig muscle. *Livestock Sci*.

Irie M & Sakimoto M. (1992). Fat characteristics of pigs fed fish oil containing eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids. *Journal animal science* 70, 470-477.

Jaturasitha S, Khiaosa-ard R, Pongpiachan P & Kreuzer M. (2009). Early deposition of n-3 fatty acids from tuna oil in lean and adipose tissue of fattening pigs is mainly permanent. *J Anim Sci* 87, 693-703.

Khal J & Tisdale MJ. (2008). Downregulation of muscle protein degradation in sepsis by eicosapentaenoic acid (EPA). *Biochem Biophys Res Commun* 375, 238-240.

Kuksis A. (1978). Fatty acids and glycerides. In *Handbook of lipid research*, ed. Hanahan DJ, pp. 341-379. Plenum Press, New York, London.

Leskanich CO, Matthews KR, Warkup CC, Noble RC & Hazzledine M. (1997). The effect of dietary oil containing (n-3) fatty acids on the fatty acid, physicochemical, and organoleptical characteristics of pig meat and fat. *J Anim Sci* 75.

Liu S, Baracos VE, Quinney HA & Clandinin MT. (1994). Dietary omega-3 and polyunsaturated fatty acids modify fatty acyl composition and insulin binding in skeletal-muscle sarcolemma. *Biochemical Journal* 299, 831-837.

MacDonald JIS & Sprecher H. (1991). Phospholipid fatty acid remodeling in mammalian cells. *Biochim Biophys Acta* 1084, 105-121.

Mateo RD, Carroll JA, Hyun Y, Smith S & Kim SW. (2009). Effect of dietary supplementation of n-3 fatty acids and elevated concentrations of dietary protein on the performance of sows. *J Anim Sci* 87, 948-959.

Meneilly GS & Elahi D. (2005). Metabolic Alterations in Middle-Aged and Elderly Lean Patients With Type 2 Diabetes. *Diabetes* 28, 1498-1499.

Minami A, Ishimura N, Sakamoto S, Takishita E, Mawatari K, Okada K & Nakaya Y. (2002). Effect of eicosapentaenoic acid ethyl ester vs. oleic acid-rich safflower oil on insulin resistance in type 2 diabetes model rats with hypertriglycerolaemia. *Br J Nutr* 87, 157-162.

- Mori Y, Murakawa Y, Katoh S, Hata S, Yokoyama J, Tajima N, Ikeda Y, Nobukata H, Ishikawa T & Shibutani Y. (1997). Influence of highly purified eicosapentaenoic acid ethyl ester on insulin resistance in the Otsuka Long-Evans Tokushima Fatty rat, a model of spontaneous non-insulin-dependent diabetes mellitus. *Metabolism* 46, 1458-1464.
- Mori Y, Murakawa Y, Yokoyama J, Tajima N, Ikeda Y, Nobukata H, Ishikawa T & Shibutani Y. (1999). Effect of highly purified eicosapentaenoic acid ethyl ester on insulin resistance and hypertension in Dahl salt-sensitive rats. *Metabolism* 48, 1089-1095.
- Nobukata H, Ishikawa T, Obata M & Shibutani Y. (2000). Long-term administration of highly purified eicosapentaenoic acid ethyl ester prevents diabetes and abnormalities of blood coagulation in male WBN/Kob rats. *Metabolism* 49, 912-919.
- Noci F, Monahan FJ, Scollan ND & Moloney AP. (2007). The fatty acid composition of muscle and adipose tissue of steers offered unwilted or wilted grass silage supplemented with sunflower oil and fish oil. *Br J Nutr* 97, 502-513.
- NRC. (1998). *Nutrient Requirements of Swine. 10th revised edition*. Natl. Acad. Sci., Washington, DC.
- Otten W, laizzo PA & Eichinger HM. (1997). Effects of a high n-3 fatty acid diet on membrane lipid composition of heart and skeletal muscle in normal swine and in swine with the genetic mutation for malignant hyperthermia. *J Lip Res* 38, 2023-2034.
- Otten W, Wirth C, Laizzo PA & Eichinger HM. (1993). A high omega 3 fatty acid diet alters fatty acid composition of heart, liver, kidney, adipose tissue and skeletal muscle in swine. *Ann Nutr Metab* 37, 134-141.
- Palmquist DL. (2009). Omega-3 fatty acids in metabolism, health, and nutrition and for modified animal product foods. *Professional Animal Scientist* 25, 207-249.
- Pires JAA, Pescara JB, Brickner AE, Rio NSd, Cunha AP & Grummer RR. (2007). Effects of abomasal infusion of linseed oil on responses to glucose and insulin in holstein cows. *J Dairy Sci* 91, 1378-1390.
- Pomar C & Marcoux M. (2005). The accuracy of measuring backfat and loin muscle thicknesses on pork carcasses by the Hennessy HGP2, Destron PG-100, CGM and ultrasound CTV grading probes. *Canadian Journal of Animal Science* 85, 481-492.
- Ponnampalam EN, Sinclair AJ, Egan AR, Blakeley SJ, Li D & Leury BJ. (2001). Effect of dietary modification of muscle long-chain n-3 fatty acid on plasma insulin and lipid metabolites, carcass traits, and fat deposition in lambs. *J Anim Sci* 79, 895-903.
- Ruzickova J, Rossmeisl M, Prazak T, Flachs P, Sponarova J, Veck M, Trzicka E, Bryhn M & Kopecky J. (2004). Omega-3 PUFA of marine origin limit diet-induced obesity in mice by reducing cellularity of adipose tissue. *Lipids* 39, 1177-1185.
- Ryu JS, Park MN, Song W & Lee YS. (2009). Dietary Fish Oil Attenuates Immobilization-Induced Soleus Muscle Atrophy via Akt Signaling Involving E3 ubiquitin ligases and p70s6k in Male Rats. *J Nutr*.
- SAS. (2000). *Statistical Analysis System*. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Simopoulos AP. (1991). Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development. *Am J Clin Nutr* 54, 438-463.
- Storlien LH, Kraegen EW, Chishlom DJ, Ford GL, Bruce DG & Pascoe WS. (1987). Fish oil prevents insulin resistance induced by high-fat feeding in rats. *Science* 237, 885-888.

Stubbs CD & Smith AD. (1984). The modification of mammalian membrane polyunsaturated fatty acid composition in relation to membrane fluidity and function. *Biochem Biophys Acta* 779, 89-137.

Thivierge MC, Bush JA, Suryawan A, Nguyen HV, Orellana RA, Burrin DG, Jahoor F & Davis TA. (2008). Positive net movements of amino acids in the hindlimb after overnight food deprivation contribute to sustaining the elevated anabolism of neonatal pigs. *J Appl Physiol* 105, doi:10.1152/jappphysiol.90352.92008.

Thivierge MC, Bush JA, Suryawan A, V.Nguyen H, Orellana RA, Burrin DG, Jahoor F & Davis TA. (2005). Whole body and hindlimb protein breakdown are differentially altered by feeding in neonatal piglets. *J Nutr* 135, 1430-1435.

Tsuzukia T, Kawakami Y, Nakagawa K & Miyazawa T. (2006). Conjugated docosahexaenoic acid inhibits lipid accumulation in rats. *J Nutr Biochem* 17, 518-524.

Valaja J, Alaviuhkola T, Suomi K & Immonen I. (1991). Compensatory growth after feed restriction during the rearing period in pigs. *Agric Sci* 1, 15-20.

Wachira Am, Sinclair LA, Wilkinson RG, Enser M, Wood JD & Fisher AV. (2002). Effects of dietary fat source and breed on the carcass composition, n-3 polyunsaturated fatty acid and conjugated linoleic acid content of sheep meat and adipose tissue. *British Journal of Nutrition* 88, 697-709.

Wood JD, Richardson RI, Nute GR, Fisher AV, Campo MM, Kasapidou E, Sheard PR & Enser M. (2004). Effects of fatty acids on meat quality: a review. *Meat science* 66, 21-32.

Yang X, Yang C, Farberman, Rideout, Lange CFMd, France J & Fan MZ. (2008). The mammalian target of rapamycin-signaling pathway in regulating metabolism and growth. *Journal animal science*, E36-E50.

Zimmerman DR & Khajarern S. (1973). Starter protein nutrition and compensatory responses in swine. *J Anim Sci* 36, 189-194.

ANNEXE

Composition en acides gras (% des acides gras totaux) des globules rouges sanguins de porcs recevant des quantités croissantes d'huile de menhaden durant les périodes de croissance 30-55 et 55-85 kg.^{1,2}

Acide gras	Période (kg)	Traitements			Erreur type	Effet des traitements	
		0 %	3 %	4 %		Lin	Quad
C14 : 0	55	0,39	0,41	0,23	0,04	0,06 [*]	0,01
	85	0,00	0,29	0,42	0,04	< ,0001	0,56
C16 : 0	55	22,6	21,9	22,1	0,21	0,04 [*]	0,21
	85	22,3	22,0	22,0	0,21	0,29	0,59
C16 : 1 n-7	55	0,41	0,69	0,44	0,09	0,37 [*]	0,03
	85	0,00	0,48	0,84	0,09	< ,0001	0,18
C18 : 0	55	13,12	15,22	15,63	0,17	< ,0001	0,34
	85	13,47	15,69	16,08	0,17	< ,0001	0,24
C18 : 1 n-9	55	28,62	23,39	25,21	0,82	,0007 [*]	0,02
	85	28,79	22,09	23,63	0,82	< ,0001	0,01
C18 : 1 n-7	55	1,20	1,55	1,74	0,03	< ,0001	0,25
	85	1,17	1,57	1,65	0,03	< ,0001	0,42
C18 : 2 n-6	55	15,38	14,32	12,30	0,50	,0006	0,06
	85	15,45	14,00	12,15	0,50	,0002	0,12
C18 : 3 n-3	55	0,31	0,42	0,30	0,04	0,66	0,02
	85	0,30	0,43	0,30	0,04	0,41	0,02
C18 : 4 n-3	55	0,19	0,23	0,27	0,01	< ,0001	0,26
	85	0,22	0,28	0,26	0,01	0,001	0,12
C20 : 0	55	0,48	0,50	0,48	0,01	0,94 [*]	0,17
	85	0,58	0,55	0,52	0,01	0,01	0,24
C20 : 2 n-6	55	0,27	0,20	0,13	0,02	< ,0001	0,13
	85	0,24	0,15	0,05	0,02	< ,0001	0,03
C20 : 3 n-6	55	0,35	0,31	0,27	0,01	,0003	0,47
	85	0,36	0,32	0,28	0,01	,0002	0,13
C20 : 4 n-6	55	4,7	2,6	2,4	0,11	< ,0001 [*]	0,02
	85	4,9	2,4	2,4	0,11	< ,0001	,0007
C20 : 5 n-3	55	0,00	3,4	3,5	0,09	< ,0001 [*]	< ,0001
	85	0,12	3,9	4,2	0,09	< ,0001	< ,0001
C22 : 0	55	2,4	2,4	2,4	0,08	0,79	0,77
	85	2,4	2,4	2,3	0,08	0,58	0,64
C22 : 4 n-6	55	0,76	0,38	0,41	0,02	< ,0001 [*]	< ,0001 [*]
	85	0,79	0,32	0,35	0,02	< ,0001	< ,0001

Acide gras	Période (kg)	Traitements			Erreur type	Effet des traitements	
		0 %	3 %	4 %		Lin	Quad
C22 : 5 n-3	55	1,1	2,5	2,1	0,07	< ,0001*	< ,0001
	85	1,0	2,6	2,4	0,07	< ,0001	< ,0001
C22 : 6 n-3	55	1,0	2,7	2,9	0,09	< ,0001*	0,03*
	85	0,71	3,1	3,2	0,09	< ,0001	,0003
C24 : 0	55	4,4	5,5	5,5	0,27	0,004	0,45
	85	4,7	5,8	5,2	0,27	0,05	0,04
C24 : 1 n-9	55	1,9	1,3	1,4	0,03	< ,0001*	,0001*
	85	2,0	1,2	1,2	0,03	< ,0001	,0002
Σ saturés	55	43,3	45,9	46,3	0,30	< ,0001	0,38
	85	43,4	46,6	46,5	0,30	< ,0001	0,02
Σ polyinsaturés	55	24,1	27,1	24,7	0,70	0,16*	0,008
	85	24,1	27,5	25,5	0,70	0,04	0,02
Σ mono-insaturés	55	32,2	27,0	28,8	0,81	,0007*	0,02*
	85	32,0	25,4	27,3	0,81	< ,0001	0,006
Σ n-3 totaux	55	2,7	9,3	9,1	0,23	< ,0001*	< ,0001*
	85	2,4	10,2	10,3	0,23	< ,0001	< ,0001
Σ LC n-3	55	2,2	8,6	8,6	0,20	< ,0001*	< ,0001*
	85	1,9	9,5	9,8	0,20	< ,0001	< ,0001
Σ n-6 totaux	55	21,4	17,8	15,6	0,54	< ,0001*	0,24*
	85	21,7	17,2	15,2	0,54	< ,0001	0,56
ratio n-3/n-6	55	0,12	0,52	0,59	0,009	< ,0001*	,0002*
	85	0,11	0,59	0,68	0,009	< ,0001	< ,0001
ratio n-6/n-3	55	8,1	1,9	1,7	0,16	< ,0001*	< ,0001*
	85	9,1	1,7	1,5	0,16	< ,0001	< ,0001

¹ Moyenne des moindres carrés, n=10

* Interaction respective traitement x périodes (linéaire ou quadratique) significatives, * signifie P < 0,05;

** signifie P < 0,01; *** signifie P < 0,001