Table des matières

Résumé iii

Abstract iv

Liste des tableaux vii

Liste des figures viii

Index des abréviations ix

Remerciements x

Avant-propos xi

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE I : Revue de littérature 5

1.1. Problématique des rejets de phosphore chez le poulet 6

1.1.1. Bref aperçu sur la production avicole québécoise 6

1.1.2. Impacts environnementaux des rejets de phosphore chez le poulet 7

1.1.3. Pression réglementaire 10

1.2. Vers la formulation de régimes durable d'un point de vue phosphore 12

1.2.1. Apports en accord avec les besoins en phosphore des poulets 13

1.2.2. Besoins en P chez les poulets de chair 15

1.2.3. Facteurs qui modulent l'utilisation de P par le poulet 16

1.3. Minimisation de l'excrétion de P sous forme soluble 19

1.3.1. Impact de l'amélioration de l'utilisation du P chez les poulets sur l'excrétion du P soluble 19

1.3.2. Insolubilisation du P par traitement des litières 19

1.3.3. Insolubilisation du P dans le tube digestif à l'aide de sels métalliques 21

1.4. Hypothèses de la recherche 28

1.5. Objectifs 28

1.5.1. Objectif général 28

1.5.2. Objectifs spécifiques 28

1.6. Références bibliographiques 29

CHAPITRE II 37

Réduction de l'excrétion de phosphore soluble par l'addition de sulfate de fer et d'aluminium encapsulés chez le poulet afin de diminuer les risques d'eutrophisation associés à cette production 38

Résumé 38

Abstract 39

2.1. Introduction 40

2.2. Matériels et méthodes 41

2.2.1. Essai préliminaire 41

2.2.2. Essai principal 42

2.3. Résultats 44

2.3.1. Essai préliminaire 44

2.3.2. Essai principal....45
2.4. Discussion 48
2.4.1. Essai préliminaire 48
2.4.2. Essai principal....50
2.5. Conclusions....52
2.6. Remerciements....53
2.7. Références bibliographiques 53

CHAPITRE III....57

Impact de de sulfate de fer micro-encapsulé sur les performances de croissance, la minéralisation osseuse et la digestibilité et l'excrétion de phosphore soluble dans l'eau chez le poulet en croissance 58
Résumé....58
Abstract....59
3.1. Introduction....60
3.2. Matériels et méthodes....61
3.2.1. Aliments expérimentaux 61
3.2.2. Animaux et conduite d'élevage....61
3.2.3. Collecte des échantillons....63
3.2.4. Analyses 64
3.2.5. Calculs et analyses statistiques....64
3.3. Résultats 65
3.3.1. Performances de croissance 66
3.3.2. Digestibilité et excrétion....66
3.3.3. Teneurs dans les tissus....69
3.3.4. Phosphore total et soluble dans le jéjunum, l'iléon, le cæcum et dans la litière 69
3.4. Discussion 69
3.5. Conclusion....74
3.6. Remerciements....75
3.7. Références 75

CHAPITRE IV 78

DISCUSSIONS GÉNÉRALES....78

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 81

RÉFÉRENCES GÉNÉRALES 83

Annexe 1....95

Annexe 2....96

Liste des tableaux

Tableau 1.1. pH des différents compartiments du tube digestif des poulets....26
Tableau 2.1. Ingrédients et composition chimique de base des aliments expérimentaux....43
Tableau 2.2.: pH, teneur en P soluble et insoluble des digesta intestinaux avant l'ajout des composés encapsulés....44
Tableau 2.3. Insolubilisation de phosphore par différentes molécules dans l'iléon distal in vitro....45
Tableau 2.4. Teneur en calcium, en phosphore total en aluminium et en fer des aliments expérimentaux...45
Tableau 2.5. Performance de croissance des poulets du jour 14 au jour 28....47
Tableau 2.6. Résultats des bilans de rétention de calcium et de phosphore du jour 24 au jour 28....47
Tableau 2.7. Résultats des bilans de rétention de fer et d'aluminium du jour 24 au jour 28....49
Tableau 2.8. Effet des traitements alimentaires sur la solubilité dans l'eau du phosphore excrété par les poulets des jours 24 à 28....49
Tableau 3.1. Descriptions des aliments expérimentaux....61
Tableau 3.2. Composition de base des aliments expérimentaux par phase....62
Tableau 3.3. Teneur en calcium, en phosphore total et en fer des aliments expérimentaux. 65
Tableau 3.4. Performances de croissance des poulets par phase en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment....67
Tableau 3.5. Digestibilité apparente jéjunale et iléale du P total, du P phytique, du calcium et du fer en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment 68
Tableau 3.6. Résultats des bilans de rétention de calcium, de phosphore et fer en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment 70
Tableau 3.7. Caractéristiques osseuses des poulets et concentration rénales et hépatiques fer en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment 70
Tableau 3.8. Niveau de solubilité du phosphore excrété par les poulets en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment....72

Liste des figures

Figure 1.1. Représentation schématique de la densité des élevages au Québec source.....8
Figure 1.2. État trophique des eaux du sud du Québec de 2002 à 2011.....11
Figure 1.3. Évolution de la solubilité d'AlPO4 et de FePO4 en fonction du pH.....25
Figure 1.4. Évolution de la concentration en P soluble de la litière des poulets en fonction des niveaux des composés à base Fer et d'aluminium ajouté dans la litière des poulets de chair 25
Figure 2.1. Insolubilisation de phosphore par le sulfate de fer en fonction du ratio Al :Fe.....45
Figure 2.2. Insolubilisation de phosphore par l'alun en fonction du ratio Al :P.....45
Figure 2.3. Relation entre la quantité de P insolubilisé et la quantité de Fe ingéré par les poulets sous forme encapsulée.....52
Figure 3.1. Représentation schématique des 9 points de collecte de la méthode d'échantillonnage en W...63
Figure 3.2. Effet du pH sur la quantité de P soluble des excreta 52

Index des abréviations

ACIA	Agence Canadienne d'inspection des aliments
ADFI	Average daily feed intake
ADG	Average daily gain
ADN	Acide désoxyribonucléique
Al	Aluminium
ARN	Acide ribonucléique
ATP	Adénosine triphosphate
BW	Body weight
Ca	Calcium
CFIA	Canadian Food Inspection Agency
CMJ	Consommation moyenne journalière
CRAAQ	Centre de recherche Agriculture et Agroalimentaire Québec
DDGS	Distiller's dried grains with solubles
FCR	Feed Conversion Ratio
Fe	Fer
FTU	Unité phytasique
g	gramme
g/kg	gramme/kilogramme
GMQ	Gain moyen quotidien
IC	Indice de consommation
kg	Kilogramme
NRC	National research council
P	Phosphore
Ppm	Partie par million ou gramme/kilogramme
Pv	Poids vif
R^2	Coefficient de détermination
UPA	Union des producteurs agricoles du Québec

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à ma directrice de recherche Marie-Pierre Létourneau Montminy Ph. D pour la confiance, la patience, la disponibilité et surtout les judicieux conseils prodigués, qui ont développé mon esprit scientifique et élargi mes connaissances. Ma profonde gratitude va également à mon co-directeur Frédérick Guay pour ses nombreux avis, sa disponibilité en tout temps et son aide de toute sorte.

Je tiens à remercier également Isabelle Lachance Msc, professionnelle de recherche, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de superviser mes travaux de terrain. Sa disponibilité, sa gentillesse et ses précieuses directives tout au long de la réalisation de ce travail m'ont beaucoup impressionné et m'ont aidé à trouver des solutions pour avancer.

Je remercie les animalières et les techniciens de laboratoire qui m'ont toujours aidé et fait en sorte que mes expériences se passent bien et sans qui le travail dans le laboratoire n'aurait pas été le même.

Je remercie également mes collègues Hector Salvador, Maroua Zouaoui, Anne Sophie-Valable, Wally N'Diaye, Catherine Couture, Elisabeth Chassé et Mélina Josiane Bouchard pour leurs aides précieuses et pour l'ambiance agréable tout au long de mes expériences de terrain.

Un remerciement spécial va à nos partenaires, l'entreprise JEFO le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) et le ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) pour avoir participés au financement de ce travail.

Ce mémoire de maîtrise n'aurait jamais abouti sans l'appui de mes parents, mes frères et mes sœurs et tous ceux qui me sont chers. Qu'ils trouvent dans ce travail le fruit de leur patience et de leur sacrifice.

Avant-propos

Ce mémoire comporte une introduction générale, quatre chapitres et une conclusion générale. L'introduction générale est organisée comme suit, mise en contexte, description de la problématique de recherche, des hypothèses ainsi que les objectifs spécifiques poursuivis. Le premier chapitre correspond à une synthèse bibliographique en rapport avec la problématique des rejets en phosphore (P) chez le poulet de façon générale et au Québec plus particulièrement, les moyens existants pour atténuer l'impact environnemental associé aux rejets de P et la possibilité d'introduire des sels métalliques encapsulés dans l'aliment des poulets pour réduire le risque environnemental des rejets de P des élevages de poulets. Le second chapitre, rédigé sous forme d'article scientifique, a permis d'étudier l'impact de l'ajout de sulfate de fer (Fe) et d'aluminium (Al) micro-encapsulés dans l'alimentation des poulets de chair sur l'excrétion de P soluble et la rétention de P et de calcium (Ca). Le troisième chapitre, rédigé également sous forme d'article scientifique a permis d'évaluer la nécessité ou non de la micro-encapsulation en comparant la digestibilité des minéraux, la minéralisation osseuse, l'accumulation dans les tissus et la proportion de P soluble dans les litières à la fin de l'élevage. Le dernier chapitre est une discussion générale qui reprend les éléments importants des deux essais et apporte des éléments nouveaux pour comprendre les résultats. Finalement, une conclusion générale qui présente de façon précise les résultats majeurs obtenus au cours de ce travail de maîtrise et leurs implications termine le document. Marie-Pierre Létourneau Montminy Ph. D et Frédéric Guay Ph. D, professeurs titulaires au département des sciences animales sont les coauteurs de ces deux articles. Ces articles seront soumis aux journaux scientifiques ''Poultry Science'' et ''Journal of Environnemental Quality''.

Rapport-Gratuit.com

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'intensification des élevages de porcs et de volailles, telle que pratiquée pendant plusieurs décennies, continue d'être problématique pour la pérennité des ressources naturelles et la protection de l'environnement, mais essentielle pour répondre à la demande mondiale en protéines animales. Aujourd'hui, sans abandonner les premiers objectifs de productivité et de rentabilité, éléments essentiels de la compétitivité des filières, les productions animales doivent évoluer dans une optique de développement durable, en assurant également l'acceptabilité environnementale et sociale des systèmes (Dourmad, 2012). Parmi ceux-ci, l'impact environnemental associé aux rejets de phosphore (P) des entreprises agricoles est une préoccupation d'importance pour les filières avicoles. Cette dernière fait en effet mauvaise presse auprès du public avec les épisodes d'algues bleues-vertes et est devenue une contrainte à laquelle les éleveurs ne peuvent se soustraire sans compromettre la légitimité de leurs activités (Boiral, 2005).

En vertu du règlement sur les exploitations agricoles en vigueur au Québec (REA, 2005; 2016), les éleveurs doivent faire une gestion précise de la charges P de leur exploitation (MDDELCC, 2016). Le P provenant du fumier épandu en surface a le potentiel de s'accumuler dans le sol lorsqu'il se trouve en excédant des besoins des plantes (Sharpley et Meyer, 1994). Lors des précipitations, par le biais des phénomènes de ruissellement et de lessivage, le P rejoint les milieux aquatiques sous forme dissoute et particulaire via les eaux de ruissellement et les particules issues de l'érosion sols. Son accumulation dans l'eau accélère le phénomène d'eutrophisation des eaux de surface qui se caractérise par des problèmes de prolifération des végétaux aquatiques, des algues et des cyanobactéries dégradant, par le fait même, les écosystèmes aquatiques (Correll, 1998). Par conséquent, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés pour trouver des moyens permettant de réduire l'impact environnemental du P contenu dans les effluents d'élevage.

L'alimentation en P a été principalement ciblée par ses études. En effet, le P apporté aux porcs et aux volailles est principalement d'origine végétale dans lequel plus du 2/3 du P se trouvent sous la forme phytique, une forme non disponible pour ces derniers qui ne possèdent pas de phytases endogènes intestinales en quantité suffisante pour dégrader le P (Waldroup, 1999). Cette faible valorisation du P végétal conduit par ailleurs à l'utilisation de marges de sécurité importantes et l'ajout de phosphate (PO_4^{3-}) minéral, ressource non renouvelable et parfois couteuse.

De nombreux travaux ont montré que l'ajout de la phytase microbienne dans les aliments représente une voie clée d'amélioration de l'utilisation de P phytique (Selle et Ravindran, 2007). L'usage de cette stratégie a permis de réduire significativement la quantité de P des aliments (25 à 40 %), et de ce fait, l'excrétion du P dans les effluents (40 à 50 %) (McGrath et al., 2005; Leytem et al., 2008). Cependant, plus de 50 % du P ingéré par les poulets est toujours rejeté (Bougouin et al., 2014). Néanmoins, au-delà de l'aspect quantitatif, la composition des rejets est également à prendre en compte, et plus particulièrement la teneur en P soluble.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

En effet, Sharpley et Moyer (2000) ont montré une corrélation positive (r=0,96) entre la quantité de P soluble épandue sur les terres agricoles et la quantité de P dissous dans les cours d'eau. Klopfenstein et Angel (2002) et McGrath et al. (2005) ont en effet montré que l'ajout de phytase réduit les apports alimentaires de P inorganique de 0,43 à 0,33 % et diminue le P total excrété (40 à 60%), mais la fraction du P soluble n'était pas modifiée. D'autres travaux ont même montré une augmentation de la proportion de P soluble lorsque la phytase a été utilisée sans réduire la quantité PO_4^{3-} minéral des aliments (DeLaune et Moore, 2004; Miles et al., 2003; Vadas et al., 2004). Compte tenu du fait que seule cette fraction de P est susceptible de ruisseler vers les cours d'eau et disponible pour la prolifération des algues (Sharpley et Moyer, 2000), la limitation des rejets de P sous cette forme représente un enjeu majeur en termes de durabilité des systèmes d'élevage dans certains bassins de production. Ceci est d'autant plus important considérant l'utilisation croissante des ingrédients alternatifs riches en P (ex. : phosphate, phytase, drêches).

Le P peut former des complexes avec d'autres nutriments et devenir insoluble. C'est le cas de certains cations di et trivalents tels le calcium (Ca), le fer (Fe) et l'aluminium (Al) (Ondreicka et al., 1971). Ces derniers sont d'ailleurs couramment utilisés pour précipiter le P et réduire la quantité émise par les stations d'épuration des eaux usées provenant des systèmes de traitement des villes (Metcalf et Eddy, 2003; Babatunde et Zhao, 2009). Moore et Miller, (1994) et Shreve et Moore, (1995) ont montré la possibilité de minimiser le transfert de la fraction soluble du P de la litière de poulets vers les cours d'eau par l'ajout des sels métalliques à base d'Al, Fe et Ca tels le sulfate d'Al (alun) et le sulfate de Fe sur la litière. Les complexes insolubles entre les cations métalliques et le P se forment pour la plupart à des pH proches de la neutralité (pH<7; Dao et al., 2001), soit les conditions de la portion distale de l'intestin grêle des poulets (Maenz et al., 1999). Seul le P soluble dans le tube digestif peut être absorbé par les volailles. La formation de complexes P-sels métalliques insolubles pourrait donc être associée à une réduction de la biodisponibilité du P. Il est ainsi essentiel que la précipitation du P soit effectuée en aval des sites d'absorption pour ne pas modifier les performances des poulets.

Des méthodes d'encapsulation consistant à protéger par enrobage des additifs et régulant leur libération dans des portions ciblées du tube digestif sont déjà bien utilisées en alimentation animale et pourraient permettre d'éviter la précipitation du P avant les sites d'absorption (Madene et al., 2006). L'enrobage est généralement du gras qui est progressivement dégradé par les lipases présentent dans le tube digestif. Ainsi, en fonction de la proportion de gras, il est possible de libérer tardivement les cations métalliques dans le tube digestif, au-delà des sites d'absorption.

L'objectif général de ce travail de maîtrise était d'évaluer la possibilité d'introduire des sels métalliques encapsulés dans l'alimentation des poulets pour insolubiliser le P non absorbé par l'animal et ainsi réduire le

P soluble excrété et les problèmes environnementaux associés sans compromettre leurs performances. Comme preuve de concept, une première expérience a évalué le potentiel de sulfate de Fe et d'alun encapsulés à insolubiliser le P dans l'intestin chez le poulet en croissance. Suite aux résultats obtenus, le sulfate de Fe a été préféré à l'Al dans une seconde expérience compte tenu du fait qu'il est déjà permis par l'ACIA. Cette expérience visait à évaluer la nécessité ou non de la micro-encapsulation en comparant la digestibilité des minéraux, la minéralisation osseuse, l'accumulation dans les tissus et la proportion de P soluble dans les litières à la fin de l'élevage.

CHAPITRE I : Revue de littérature

1.1. Problématique des rejets de phosphore chez le poulet

Dans les régions agricoles québécoises, la dégradation de la qualité des écosystèmes aquatiques est une lourde conséquence de l'élevage tant du point de vue économique que sociétal. Le P est le principal nutriment mis en cause dans la pollution des eaux (Jamieson et al., 2003). Les indicateurs développés par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) pour évaluer et pour décrire l'ampleur de ce phénomène de pollution montrent un niveau de risque très élevé pour la production avicole (UPA, 2000). L'accent a été mis sur le développement du secteur avicole en raison d'une croissance qui n'a pas toujours été réalisée dans un contexte de développement durable (Pomar, 2008). En effet, dans les systèmes d'élevage traditionnels québécois, l'élément considéré le plus important au moment d'implanter une ferme d'élevage était la distance des bâtiments d'élevage avec les superficies cultivées. Dans ces systèmes, le recyclage des rejets du P se faisait à l'échelle de la ferme (Estevez et Domon, 1999). Le P du sol était absorbé par les plantes puis ingéré par les animaux et restitué au sol via les déjections. Cependant, l'intensification de l'élevage, et la spécialisation ou concentration dans certaines régions vers l'élevage ou les pratiques de monocultures, ont depuis les années 1980 changé le cycle biogénique du P et entrainé une forte accumulation du P dans les sols environnants. L'excès en P du sol a le potentiel de se ruisseler vers les eaux de surface, facilitant ainsi l'eutrophisation (Sharpley et Moyer, 2000).

Cette première partie de la revue bibliographique se propose d'intégrer l'état actuel des connaissances afin de fournir des éléments qui permettront de comprendre l'évolution de la problématique des rejets en P chez le poulet au Québec. Il sera fait mention d'un bref aperçu sur l'évolution de l'aviculture au Québec au cours de la période de 1980 à 2016, ainsi que sur les impacts potentiels des activités avicoles sur l'environnement et les politiques reliées à la prévention de la pollution par le P au Québec.

1.1.1. Bref aperçu sur la production avicole québécoise

L'aviculture compte aujourd'hui parmi l'un des secteurs de production agricole les plus performants au Québec. En 2015, les ventes en produits à base de volailles représentaient environ 10% des recettes agricoles de la province, laquelle se retrouvait au second rang de la production canadienne, derrière l'Ontario (Les Éleveurs de Volailles du Québec, 2015). En fonction du type de produit majoritairement obtenu, au Québec, trois grandes filières composent ce secteur d'activité : les volailles de chair, les œufs de consommation et les œufs de reproduction. Pour la filière de volailles de chair, les poulets et les dindons de chair sont les plus importants. En 2015, la production avicole québécoise était estimée à plus de 410 millions de kg de poulets éviscérés, générant ainsi un revenu de 1,4 milliard de dollars canadiens (Les Éleveurs de volailles du Québec, 2015).

Cette bonne performance économique est attribuable entre autres, à la croissance spectaculaire qu'a connue ce secteur au cours des 30 dernières années afin de répondre à l'augmentation croissante de la consommation en viande blanche. En effet, bien que le nombre d'exploitations demeure pratiquement inchangé depuis les années 1980 (de 731 en 1980 à 746 en 2016), de nombreuses transformations ont été effectuées au sein des constituants de ces systèmes, soit une augmentation de la taille des exploitations et leurs émergences vers des systèmes beaucoup plus spécialisés, favorisant ainsi le développement des élevages hors-sol et une concentration plus dense des élevages dans certaines régions. Par exemple au cours de la période de 1980 à 2016, la population de volaille de chair a augmenté de 115% en passant de 89,634 à 192,371 millions de têtes d'oiseaux (Statistiques Canada, 2016). Toutefois, il est important de signaler que 80 % de cette croissance a été réalisée au cours des années 1990 et que depuis le début du millénaire, on assiste à une stagnation de la production. Ceci s'explique par le fait que les autorités québécoises, dans le souci de maintenir cette filière compétitive et dans un contexte de régulation du marché, ont assujetti cette production à un système de gestion de l'offre via une entente fédérale-provinciale (MAPAQ, 2011). Ce système permet d'obtenir une stabilité permanente des prix des produits autant pour les producteurs que pour les consommateurs, ainsi qu'un approvisionnement garanti pour les transformateurs, ce qui limite l'expansion rapide du secteur au Québec (Groupe Agéco, 2014). Au niveau géographique, les élevages sont aujourd'hui concentrés dans la partie du sud du Québec avec un nombre d'animaux nettement plus élevé dans le centre-sud du Québec, notamment avec une concentration de 45 % des élevages dans les régions du Saint-Laurent comme Chaudière-Appalaches, Montérégie et Lanaudière (Figure 1.1) (Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois, 2006).

1.1.2. Impacts environnementaux des rejets de phosphore chez le poulet

Les problèmes environnementaux liés au P dépendent notamment de la quantité d'élevage par unité de surface (Figure 1.1). En effet, dans les systèmes mixtes d'agriculture et d'élevage d'autrefois, le recyclage des fumiers se faisait localement et tous les nutriments rejetés étaient restitués au sol. Cependant, l'intensification des élevages de volailles et des monogastriques en général, ainsi que l'augmentation de la spécialisation et de la concentration d'élevages dans les régions du fleuve de Saint-Laurent comme Chaudière-Appalaches, Montérégie et Lanaudière ont conduit à des augmentations phénoménales des déjections produites dans les élevages. L'élimination de ces déjections est difficilement conciliable avec le respect de l'environnement en raison qu'elles nécessitent de plus grande surface pour l'épandage, laquelle est limitée dans ces régions. Par conséquent, l'épandage des surplus de déjections au-delà des besoins des plantes peut engendrer plusieurs impacts environnementaux, dont les plus préoccupants sont la détérioration des sols, la contamination de l'eau de surface et de souterraine.

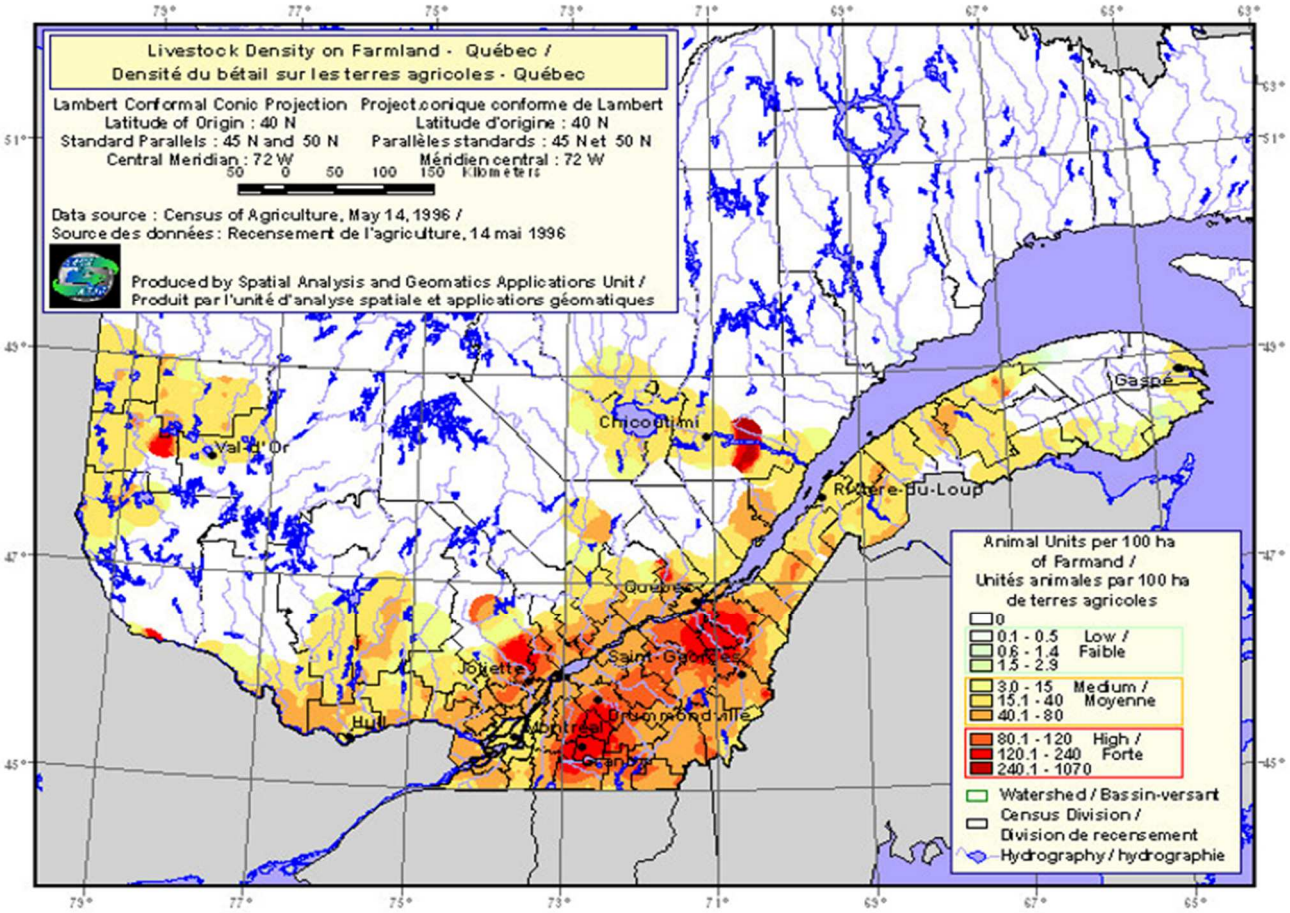


Figure 1.1. Représentation schématique de la densité des élevages au Québec source : (Image tirée de Beaulieu, 2002)

1.1.2.1. Au niveau du sol

Une évaluation sommaire à partir de la quantité de fumier produit dans les élevages avicoles au Québec a montré que la quantité de P générée dans les élevages au cours de la période de 1980 à 2016 a presque doublé et est passée de 3,9 à 8,4 millions de kg de P_2O_5, principalement en raison de la croissance du nombre de têtes d'oiseaux dans les élevages (CRAAQ, 2003). En rapport avec la fertilisation organique des champs, au cours de la période de 1981 à 2006, plusieurs régions agricoles au Québec à l'échelle des fermes et des bassins versant qui recevaient régulièrement des fumiers d'animaux étaient en condition de sur-saturation en P (CRAAQ, 2010). Les bassins versant des rivières Chaudière et Yamaska et certaines régions agricoles des basses terres du fleuve Saint-Laurent sont parmi les régions dont les bilans à la surface du sol étaient plus ou moins importants et variaient entre 25 kg à 43 kg P_2O_5/hectares au cours des années 2000 et 2002 (Beaudet, 2002).

Un autre enjeu environnemental du fumier des volailles se trouve dans les pratiques agronomiques. En effet, le fumier est épandu pour satisfaire les besoins en azote (N) des cultures. Edwards et Daniel (1993) ont montré que les fumiers avicoles présentent généralement un rapport moyen N:P de 3: 1, alors que la plupart des plantes céréalières ou fourragères prélèvent l'N et le P selon un rapport N:P de 8:1. Cette pratique fournit ainsi beaucoup plus de P que les besoins des plantes, créant ainsi la sursaturation des sols en P. De plus, en comparant le risque de transfert des fumiers avicoles et les engrais minéraux, Sharpley et Smith (1985) ont souligné une forte disponibilité à court terme du P soluble dans le sol ayant reçu les engrais des volailles comparées au sol fertilisé avec un engrais inorganique. D'autres auteurs soutiennent que les engrais organiques entrainent une capacité d'adsorption plus faible dans les sols qu'une fertilisation minérale, ce qui augmente le risque de transfert du P qui se retrouve en excès vers les eaux de surfaces (Mozaffari et Sims 1994; Sharpley et Meyer, 1994).

1.1.2.2. Au niveau de l'eau

Dans les régions à forte concentration d'élevage, l'eau de surface est le réceptacle des excès de nutriments appliqués sur les sols. En effet, pour le P, la part soluble et particulaire épandue en excès aux besoins des plantes rejoint facilement les eaux de surface selon deux principaux modes de transfert, soient la dissolution et le transport particulaire. La dissolution implique la solubilisation des formes de P minéral fixés aux particules du sol et le transport subséquent des ions phosphatés par lessivage. Le transport particulaire implique le détachement et la prise en charge du P associé aux particules minérales ou organique du sol par ruissellement.

L'apport excessif en P dans les cours d'eaux stimule la prolifération des algues vertes et des cyanobactéries. Ces algues, en se développant, consomment toutes les réserves d'oxygène du milieu, induisant ainsi une anoxie totale, ce qui devient défavorable à la survie des autres espèces aquatiques (Correll, 1998; Sharpley et Meyer, 1994). Au Québec, ce phénomène constitue une problématique omniprésente dans les basses-terres du fleuve Saint-Laurent. En 1998, les excédents en P étaient de l'ordre de 120 % pour la rivière la Chaudière, 180 % pour la rivière l'Assomption et 185 % pour la rivière Yamaska (seuil normal ≤ 0.03 mg de P/l) (Bilodeau, 1998). Parmi les 665 lacs du sud du Québec observés entre les années de 2002 jusqu'à 2011, 76 % montraient peu de signes d'eutrophisation avancée (MDDEFP, 2013). Cependant, la grande majorité de ces lacs avait montré des concentrations en P qui étaient supérieures au seuil critique d'eutrophisation, soit 0.03 mg/l, ce qui rendait ces lacs propices à la prolifération d'algues et de plantes aquatiques. Les autres 24 %, situés principalement dans les rivières sillonnant les basses-terres du fleuve Saint-Laurent, montraient des signes d'eutrophisation avancés (Figure 1.2). Selon le dernier rapport publié par la MDDEFP (2013), une grande majorité des écosystèmes aquatiques situés à proximité des zones où dominent principalement les grandes cultures et les élevages dits hors-sol de porcs et de volailles coïncide pour la plupart avec des hauts risques de contamination par le P.

1.1.3. Pression réglementaire

Pour pallier aux impacts négatifs des rejets des élevages pour l'environnement, de nombreuses directives ont été mises en place par les autorités nord-américaines et Européennes dès le début des années 1990. L'Union Européenne, dans sa politique sur la protection de l'eau, a adopté la directive des nitrates le 12 décembre 1991. Cette directive s'était donné comme objectif de lutter contre la pollution des eaux due à des excès en nitrate d'origine agricole et source de phénomène d'eutrophisation (Espagnol et Leterme, 2009). Aux États-Unis, la politique environnementale était plutôt focalisée sur la protection des ressources naturelles, en assurant une utilisation rationnelle de celles-ci, tout en limitant la pollution environnementale (Sharpley et al., 2006). Dans cette même perspective, plusieurs États Américains, dont Alabama, Arkansas, Delaware, Florida, Georgia, Kentucky, Maryland, Minnesota, Mississippi, Missouri, Ohio, Oklahoma, Pennsylvania, Tennessee, Texas, Virginia présentent par exemple des lois sur l'obligation d'utiliser la phytase (Maguire et al., 2007).

Au Québec, suite à l'évolution de la pollution engendrée par les rejets de P, le Règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole (RRPOA) a été adopté en juillet 1997. Le RRPOA avait pour objectif de réduire la contamination des eaux par l'N et le P. Ce règlement était basé sur des concepts techniques de gestion, de stockage, de l'entreposage des effluents et de la fertilisation par les déjections animales, les composts et les engrais minéraux pour les fermes de production animale ou de production végétale. Ce dernier a ensuite évolué vers le Règlement sur les exploitations agricoles (REA, 2002).

Rapport-Gratuit.com

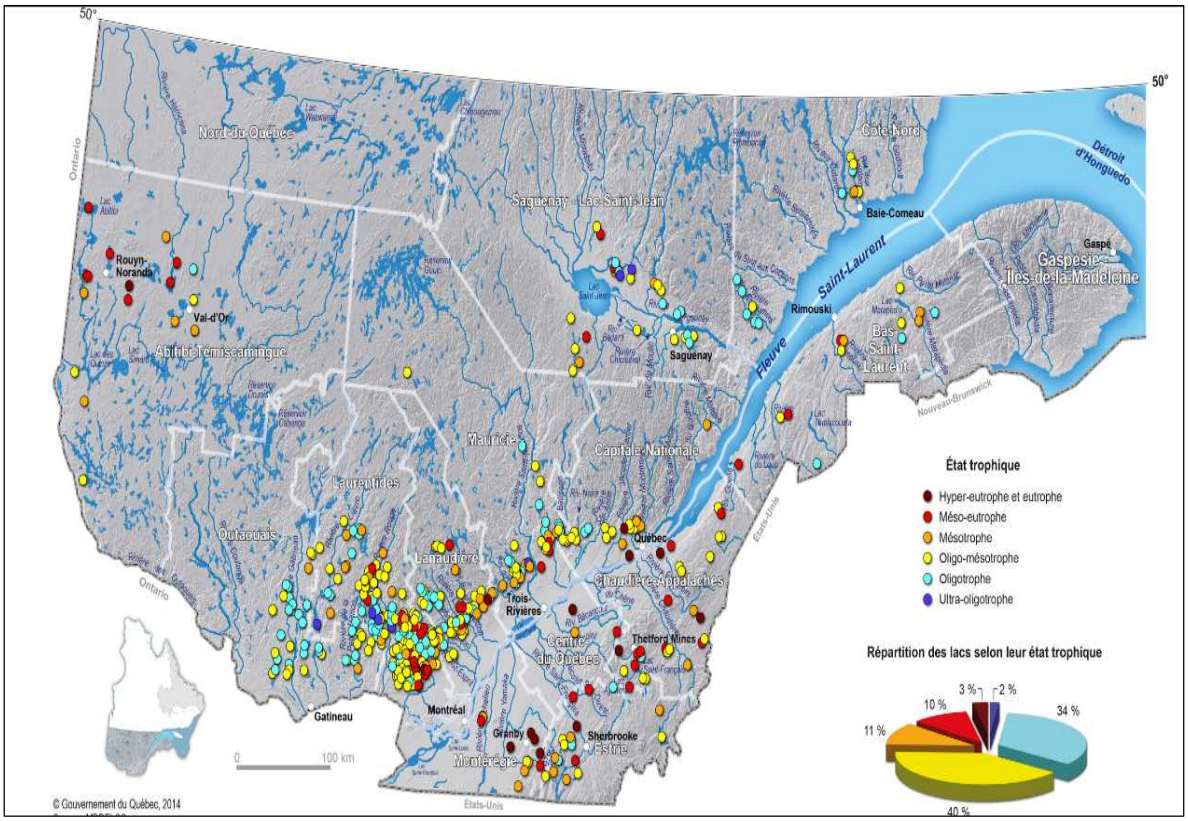


Figure 1.2. État trophique des eaux du sud du Québec de 2002 à 2011: (Image tirée de MDDELCC, 2013).

Le REA est d'autant plus sévère et résulte d'une situation désastreuse de surplus de déjections animales dans des régions à forte densité d'élevages, où les systèmes hors sol se sont installés et se sont développés durant les 30 dernières années avec le soutien des politiques agricoles gouvernementales de l'époque (Flaten et al., 2003). Elle redéfinit l'épandage des fumiers sur les normes de P et oblige les gros producteurs de volailles à consigner, dans un plan agroenvironnemental de fertilisation, la charge de P produite dans un lieu d'élevage et à préciser la manière dont celui-ci sera disposé pour qu'il satisfasse les exigences réglementaires. Dans le cas des élevages de porcs et de volailles, plusieurs sanctions étaient imposées aux agriculteurs qui dépassaient les normes de production de P (Flaten et al., 2003). L'efficacité de ces lois et règlements était appuyée par la mise en place de pratiques d'élevages ou d'alimentations visant à mieux maitriser en amont les impacts environnementaux associés aux rejets de P.

1.2. Vers la formulation de régimes durable d'un point de vue phosphore

Le phosphore est un macronutriment essentiel pour toutes les formes de vie et se trouve impliqué dans d'innombrables processus biologiques chez les animaux. Chez le poulet, il intervient principalement dans le développement en tant que constituant des os et des muscles. Les conséquences d'une carence en ce minéral se traduisent principalement par des problèmes de minéralisation osseuse et des anomalies du squelette (Van Der Klis et Versteegh, 1996). Le P apporté aux porcs et aux volailles est principalement d'origine végétale dans lequel plus du 2/3 du P se trouvent sous la forme phytique, une forme non disponible pour ces derniers qui ne possèdent pas de phytases endogènes intestinales en quantité suffisante pour dégrader le P (Waldroup, 1999; Yan et Waldroup, 2006). Cette faible valorisation du P végétal conduit par ailleurs à l'utilisation de marges de sécurité importantes et l'ajout de phosphate (PO_4^{3-}) minéral, ressource non renouvelable et parfois couteuse(Waldroup, 1999).

Deux défis de taille se posent pour la production de poulets et de monogastriques en général, 1) la difficulté d'assurer l'offre en P pour les générations futures compte tenu que les phosphates sont une ressource non renouvelable et que l'alimentation animale (5 %) vient loin derrière le marché des engrais (80%) et des produits de nettoyages (12%) (Castillon, 2005; Pellerin et Nesme, 2012) et 2) des rejets de P trop importants en raison de la faible disponibilité du P d'origine végétal, des forts apports de celui d'origine minérale et de la concentration géographique de l'élevage. Il est ainsi important de trouver de nouvelles voies alimentaires d'optimisation de l'utilisation de P par les poulets afin de maîtriser les apports et d'en limiter l'excrétion dans l'environnement tout en maintenant des performances de croissance optimales. L'optimisation de l'utilisation du P chez les poulets implique trois principaux : 1) des apports en accord avec les besoins des poulets, 2) une fine connaissance et quantification des facteurs qui modulent l'utilisation de P par les poulets et 3) une minimisation de la part de P excrétée sous forme soluble.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.2.1. Apports en accord avec les besoins en phosphore des poulets

Le devenir digestif du P alimentaire est soit l'absorption ou l'excrétion au niveau des fèces et le devenir métabolique est la rétention dans les tissus osseux ou mous ou l'excrétion dans l'urine. Notons que chez le poulet la distinction est plus difficile compte tenu que les fèces et les urines sont mélangées. Pour bien comprendre les facteurs qui détermineront la quantité de P que l'animal déposera dans ses tissus ou excrétera dans ses déjections, il convient de bien connaitre les facteurs qui modulent la variation de la digestibilité du P et l'utilisation métabolique du P alimentaire et ainsi que les besoins des animaux.

1.2.1.1. Flux de Phosphore

Les flux de P qui circulent dans l'organisme des animaux sont sous la dépendance d'un ensemble de phénomènes complexes, faisant intervenir 3 principaux organes : le tube digestif, les reins et les os.

Intestin

Chez les volailles, le P est principalement absorbé dans le duodénum et le jéjunum selon deux mécanismes distincts, l'un passif et l'autre actif (Hurwitz et Bar, 1965) dont l'importance respective de chacun d'eux dépend de la quantité de P apporté par l'aliment. Le mécanisme d'absorption passif est paracellulaire, non saturable, et dépend du gradient électrochimique entre la lumière intestinale et le plasma. Ce mécanisme est facilité lorsque les apports en P alimentaires respectent ou excèdent les normes et les seuils des besoins des animaux. Le mécanisme de transport actif, est transcellulaire et non saturable, et se fait à contre gradient. Ce mécanisme nécessite la présence de transporteurs pour entrer et pour sortir dans le milieu intracellulaire. Le cotransport Na-P est l'un des transporteurs les plus connus et permet simultanément l'entrée du Na et du P dans l'entérocyte (Schröder et al, 1996). Le transport actif est stimulé par la sécrétion de la 1,25 $(OH)_2D_3$ et par de faibles niveaux du P alimentaire. Toutefois, chez les animaux nourris avec un régime carencé en P, le mécanisme de transport actif peut représenter jusqu'à 78% du transport total de P absorbé (Eto et al., 2006).

La proportion de P qui sera absorbée et prise en charge par les mécanismes de transport au niveau de la paroi intestinale provient des aliments et dans une moindre mesure des sécrétions endogènes. Ces dernières proviennent des sucs digestifs et du renouvellement constant des cellules de la muqueuse intestinale (Fernandez et al., 1995). La forme de P provenant de la sécrétion endogène est considérée comme un flux inorganique, soluble et très absorbable. Une fraction de ce P sera réabsorbée par l'intestin et le reste sera directement rejetée dans les excreta sous forme soluble. Dilger et Adeola (2004) ont évalué par régression les pertes endogènes de P à environ 5,2% de la quantité de P ingéré chez le poulet en croissance. Des niveaux de 6,0 et 9,9 % ont été également signalés dans deux autres études conduites par Rutherford et al (2002; 2004)

Rein

Les reins sont impliqués dans la filtration du sang, l'élimination des déchets via l'urine et dans le maintien de l'équilibre phosphocalcique. Ils sont dotés de capacité pour augmenter ou pour diminuer la réabsorption tubulaire du P en fonction des besoins de l'organisme. Environ 85 à 90 % du P est réabsorbé au niveau des tubules rénaux grâce à des mécanismes de diffusion transcellulaire et paracellulaire, similaire au procédé d'absorption qui se produit dans l'intestin grêle (Courbebaisse et Souberbielle, 2011).

Os

L'os est la réserve de P et de Ca dans l'organisme. Grâce à un processus appelé, remodelage osseux, il constitue un tissu métaboliquement actif. Sa formation et son renouvellement sont assurés par ses différentes cellules osseuses; les ostéoblastes, les ostéocytes et les ostéoclastes. Les ostéoclastes détruisent l'os et d'autres cellules, les ostéoblastes, reconstruisent un os « nouveau ». Le remodelage osseux est très important à intégrer dans la réflexion sur le métabolisme du Ca et du P puisque lors de la résorption osseuse, Ca et P sont transférés de l'os vers le plasma, alors que lors de la formation osseuse ces éléments vont du plasma vers l'os. La formation et la résorption osseuse sont deux processus étroitement couplés, c'est-à-dire que lorsque les ostéoclastes sont plus actifs, les ostéoblastes le sont (Van der klis, 1970).

1.2.1.2. Homéostasie phosphocalcique

Les flux de P et de Ca entre ces différents organes et tissus sont conjointement régulés par 3 hormones principales : la parathormone (PTH), le calcitriol et la calcitonine. Bien que les voies d'utilisation, d'absorption et d'excrétion du Ca et du P ne soient pas liées, les voies de régulation du P dans l'organisme ne peuvent être considérées seules.

Parathormone

En cas d'hypocalcémie, la PTH est sécrétée par les glandes parathyroïdiennes. Elle libère le Ca osseux vers le plasma et contribue à relever la calcémie. Une autre action de la PTH est d'augmenter la réabsorption rénale du Ca principalement au niveau du tubule contourné distal et de diminuer celle de P. La PTH favorise également la synthèse et l'activité de la 1-α-hydroxylase, qui catalyse la transformation de la 1, 25-hydroxyvitamine D (25OHD) en 1,25-dihydroxyvitamine D_3 ou calcitriol.

Calcitriol

Le calcitriol (1,25-dihydroxyvitamine D_3) est le métabolite actif de la vitamine D. Il est classé comme une hormone stéroïdienne à cause de ses rôles fonctionnels dans l'absorption du Ca et du P dans l'intestin, la réabsorption du Ca et du P dans le rein et la mobilisation ou l'accumulation du Ca et du P dans les os. Une

des plus importantes fonctions de la 1,25-dihydroxyvitamine D_3 est le maintien de l'homéostasie phosphocalcique par augmentation de l'absorption intestinale du Ca et du P. Sa synthèse est indirectement stimulée par l'hypocalcémie via la PTH et directement par l'hypophosphatémie (Courbebaisse et Souberbiel, 2011).

Calcitonine

La calcitonine est un polypeptide secrété par les cellules para folliculaire de la thyroïde. Elle est secrétée quand la concentration de Ca plasmatique dépasse le seuil physiologique. En cas hypercalcémie, la calcitonine chez le poulet de chair inhibe l'ostéolyse et par conséquent met fin à la libération du Ca et du P (Van der klis, 1970; Courbebaisse et Souberbiel, 2011). Elle favorise également une augmentation de l'excrétion rénale du Ca et du P et tout en provoquant une inhibition de la synthèse rénale de la calcitriol.

1.2.2. Besoins en P chez les poulets de chair

L'estimation des besoins en P des poulets dépend du critère de production que l'on cherche à optimiser. Les besoins des poulets de chair disponibles dans les tables d'alimentation datent plus de 20 ans (e.g. NRC, 1994; Lesson et Summers, 2005), et sont d'autant plus difficiles à adapter aux conditions pratiques puisqu'elles ne coïncident pas aux génotypes des oiseaux actuels. Ainsi, de larges marges de sécurité, sont historiquement appliquées pour pallier à ces incertitudes. Avec l'objectif de réduire les rejets, de nombreux travaux ont été réalisés et ont montré qu'il était possible d'abaisser les apports de P en abaissant notamment le Ca (Létourneau-Montminy et al., 2012).

1.2.2.1. Détermination des besoins en P

La détermination des besoins nutritionnels peut se faire de deux façons: une première approche est dite empirique et constitue une approche globale de la mesure de l'efficacité d'utilisation par l'animal. Elle est basée sur le principe d'un apport progressif du P alimentaire, dans le but de trouver le niveau d'incorporation du P qui permet d'optimiser un caractère d'utilisation donné. La seconde approche est dite factorielle et consiste à décomposer les besoins de l'animal en différentes composantes de manière à les modéliser et à les ajustées en fonction de l'âge, le sexe, le génotype, le stade physiologique ou le niveau de production de l'animal. Selon cette approche, la quantité de P nécessaire pour satisfaire les besoins des animaux en croissance est la somme des besoins d'entretien et de croissance. Des travaux très récents proposent de suivre cette dernière approche pour le poulet de chair (Narcy et al., 2017).

1.2.3. Facteurs qui modulent l'utilisation de P par le poulet

Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'utilisation digestive et métabolique du P alimentaire dans le régime des poulets. Ces facteurs sont soient liés à l'aliment ou au statut minéral de l'animal. Les facteurs alimentaires de la variation de la biodisponibilité du P dans l'aliment des poulets incluent la forme de P et le niveau de Ca dans l'aliment, l'ajout de la vitamine D_3 et l'ajout de la phytase. Ces facteurs peuvent agir de concert pour réduire ou augmenter la disponibilité du P alimentaire.

1.2.3.1. Forme de phosphore

La forme du P des ingrédients entrant dans la formulation d'un régime détermine l'utilisation du P par l'animal. En effet, l'absorption du P est fonction du degré de solubilisation et d'hydrolyse du P alimentaire. Généralement, les phosphates (PO_4^{3-}) inorganiques d'origine minérale ou animale (ex. farines de poisson, d'os, de volaille, de viande ou de sang) sont très solubles dans le contenu intestinal, et donc facilement disponibles pour l'absorption. Les PO_4^{3-} minéraux les plus utilisés dans l'alimentation des poulets de chair sont les phosphates bicalciques (~19% de P) et les phosphates monocalciques (~21% de P) dont la biodisponibilité est de 85 et 91 % (Sauvant et al., 2004). Les farines animales représentent une source peu coûteuse et riche en P disponible pour les poulets.

Contrairement aux sources de P inorganiques, le P organique présent dans les matières premières d'origine végétale est majoritairement sous la forme phytique, une forme partiellement disponible pour les poulets en raison qu'ils ne disposent pas en quantités suffisantes l'équipement enzymatique approprié pour le dégrader (Selle et Ravindran, 2007). Pour être absorbé, cette dernière doit être préalablement hydrolysée par les phosphatases et les phytases (Selle et Ravindran, 2007). L'utilisation des nouveaux ingrédients riches en P disponible, tels le maïs hybride à faible teneur en P phytique et les drêches de distillerie, est aussi une stratégie de plus en plus efficace pour améliorer l'utilisation du P alimentaire.

1.2.3.2. Ajout de phytase

Un autre moyen pour optimiser l'utilisation du P par l'animal est l'ajout de la phytase microbienne dans le régime. Les phytases sont des enzymes qui permettent l'hydrolyse de la molécule de phytate et la libération des groupes PO_4^{3-} organiques qui y sont liés. Chez la volaille, le site d'action de cette enzyme se trouve dans le proventricule et le gésier où le pH acide est plus propice à leur activité. L'addition de phytase dans les aliments est actuellement le moyen le plus efficace pour améliorer l'absorption et la digestibilité du P alimentaire. Le taux d'hydrolyse des phytates varie avec le taux d'incorporation de la phytase microbienne dans le régime. Généralement, il a été démontré que jusqu'à 45 à 69% du P phytique peut être libéré dans la ration des animaux lorsque la phytase microbienne (*E. coli*) est ajoutée dans un régime de type maïs-tourteau

soja à un taux de 500 FTU/kg (Selle et al., 2009; Zeller et al., 2015). De même, des réductions de l'ordre 25 à 40 % du P inorganique et de 40 à 50 % des rejets (Waldroup, 1999; Maguire et al, 2003; Boungouin et al., 2014) ont été obtenues lorsque le régime des poulets a été supplémenté avec de la phytase microbienne. Toutefois, plusieurs facteurs dont la concentration en phytate, en Ca et en minéraux traces (e.g. Fe, Zn; Akter et al., 2015) dans l'aliment peuvent influencer l'efficacité des phytases microbiennes (Selle et Ravindran, 2009; Akter et al; 2017). Celle-ci est par exemple plus élevée quand l'aliment supplémenté est déficient en phosphore phytique et en Ca (Selle et Ravindran, 2009). Outre les quantités de phosphore, la capacité de la phytase à libérer le phosphore phytique dépendrait aussi du stade physiologique des animaux (Adeola et al., 2006).

1.2.3.3. Concentration en calcium

L'efficacité d'utilisation du P par l'animal est aussi directement liée à la concentration de Ca de l'aliment, en raison qu'ils partagent des voies régulations métaboliques communes, et aussi en tant que principaux constituants de la trame minérale osseuse. La dégradation du P phytique dans le tractus gastro-intestinal des poulets en croissance ainsi que l'absorption de P dans l'intestin grêle est diminuée pour des niveaux de Ca trop élevés dans l'aliment, d'autre part, le P absorbé va être excrété dans l'urine si la concentration de Ca alimentaire est trop faible (van der Klis et Versteegh, 1997; Selle et Ravindran, 2009). Tanim et al (2004) rapportent que le poulet est capable de dégrader 69,2% de P phytique dans les régimes à faibles concentration en Ca (≤0,2%). Cependant, l'augmentation de la concentration de Ca dans l'aliment (≥0,5 %) la réduit à moins de 25,4 %. Une des explications les plus probables de l'effet d'une concentration élevée en Ca est que le surplus de Ca vient se fixer aux phytates et aux phosphates alimentaires pour former des complexes insolubles, réduisant par le fait même la digestibilité du P et l'efficacité de la phytase à liber le P(Hurwitz et Bar, 1971; Selle et Ravindran; 2007). Une autre action d'une concentration élevée en Ca, c'est qu'elle peut provoquer une augmentation significative du pH gastro-intestinal afin de réduire l'hydrolyse des phytates, l'absorption et la digestibilité apparente du P (Walk et al., 2012). Plusieurs études montrent que les effets du Ca peuvent être maitrisés en diminuant de façon conjointe les apports en Ca et en P de l'aliment (Driver et al., 2005; Rama et al, 2006). Létourneau-Montminy et al (2010) soutiennent que pour le Ca, cette diminution doit toutefois se faire avec précaution pour être sans danger pour l'animal, en raison que ces deux minéraux sont retenus sous forme d'hydroxyapatite dans l'os suivant un ratio 2,2:1(Ca : P). Un faible niveau de Ca alimentaire risquerait de compromettre la minéralisation osseuse et d'augmenter l'excrétion urinaire de P. Les résultats de la méta-analyse de Létourneau-Montminy et al (2010) suggèrent que le niveau de Ca de l'aliment doit être ajusté tant pour les critères de performance (6 g/kg) que pour la minéralisation osseuse (10 g/kg) pour une utilisation efficace du P alimentaire dans un régime à base de maïs et de tourteau de soya.

1.2.3.4. Vitamine D

L'efficacité d'utilisation du P alimentaire par l'animal est aussi affectée par l'ajout de la vitamine D ou de ces métabolites dans le régime. Il faut se rappeler que la vitamine D est essentielle dans l'absorption du Ca et du P. Son action se déclenche lorsqu'elle se trouve sous sa forme active, la vitamine D3 ou 1,25-$(OH)_2$-D_3. Elle intervient dans l'absorption intestinale du P et du Ca en stimulant son transport dans la lumière intestinale vers l'intérieur des entérocytes par l'intermédiaire du transporteur et en augmentant la réabsorption rénale et la résorption osseuse « NaPi transporter » (Wasserman et Taylor, 1973). Une autre action de la vitamine D_3 est qu'elle vient en aide à la phytase microbienne pour augmenter l'assimilation du P et réduire son excrétion (Davies et al, 1970). Dans une étude conduite par Roberson et Edwards (1994), l'addition de 5 µg/kg de 1,25 dihydroxy-cholécalciférol dans le régime a augmenté la rétention du P de 31,4 % à 68,4 % chez les poulets de chair nourris avec un régime carencé en P. Cette même étude avait également signalé l'effet additif de la vitamine D3. En effet, la rétention du P des poulets nourris avec un régime additionné de phytase (75, 150, 300, 600 UFU/kg) était 56.4, 59.1, 52.7, 64.9 %, respectivement. Lorsque 10 µg de 1, 25 dihydroxy-cholécalciférol ont été introduits dans l'aliment, la rétention était passée à 80.6, 87.4, 83.4 et 82.2 %, respectivement. De même les résultats d'une méta-analyse de Faridi et al (2014) ont conclu que 10 µg de vitamine D dans l'aliment des poulets soit le seuil optimal pour améliorer les performances des poulets de chair.

1.2.3.5. Statut minéral de l'animal

Le statut minéral de l'animal affecte également l'utilisation du P alimentaire. En effet, il a été démontré que les oiseaux étaient capables de s'adapter à une restriction de P au cours de la première semaine post-éclosion (Yan et al, 2006; Rousseau et al., 2016). Ces animaux répondent à une restriction en augmentant le taux d'absorption et l'utilisation du P alimentaire et en réduisant l'excrétion du P. Cette augmentation de l'efficacité d'absorption peut être attribuée à une accentuation de la synthèse de la vitamine D3 et a une augmentation du nombre des transporteurs dans la paroi intestinale (Ashwell, 2007). Ceci a été confirmé dans une étude de Ashwell et Angel (2012). En effet, ces auteurs ont montré que des poulets nourris avec un aliment carencé en P durant les 3 premiers jours de vie étaient capable de supporter une déficience en P en phases de croissance et de finition comparativement à ceux nourris avec un régime équilibré. Tout récemment, Valable et al (2017) ont montré qu'une restriction en P et Ca en phase de croissance est sans danger pour les performances de croissance des poulets, mais affecte la minéralisation osseuse, qui peut être restaurer en phase de finition lorsque les apports en P et Ca sont suffisants. Rousseau et al (2016) a montré qu'une restriction en P chez les poulets âgés de 10 à 21 jours peut entrainer une augmentation de la quantité d'ARNm pour plusieurs gènes codant pour les transporteurs P au cours de 22 à 35 jours d'âge.

1.3. Minimisation de l'excrétion de P sous forme soluble

1.3.1. Impact de l'amélioration de l'utilisation du P chez les poulets sur l'excrétion du P soluble

Dans les deux dernières décennies, une attention particulière a été portée à la fraction soluble du P des rejets des poulets compte tenu de son effet rapporté sur l'eutrophisation. Ceci a été notamment le cas de l'ajout de phytase afin de s'assurer que cette dernière bien qu'en diminuant l'excrétion de P total n'augmente pas celle de P soluble. Les résultats n'étaient cependant pas équivoques. Angel et al (2005) ont montré que l'ajout de la phytase microbienne dans un aliment à faible teneur en P permet de diminuer de 54 à 83% la proportion du P soluble des excréta des poulets. Ces résultats sont en accord avec d'autres études conduites chez le poulet (Maguire et al, 2003; Maguire et al., 2004; Smith et al 2004). Toutefois, Applegate et al (2003) ont montré que la solubilité du P excrété était toujours plus élevée lorsque la phytase est ajoutée dans un régime équilibré en P (NRC, 1994) comparé au régime à faible teneur en P. Ces observations ont été aussi confirmées par les résultats dans d'autres études conduites par Delaune et Moore (2004), Miles et al (2003) et Vadas et al (2004). Metzler et al (2008) montrent que cette augmentation serait davantage en cas de superdosing de phytase (haute dose). Walk et al (2012) expliquent cet effet par une dégradation accrue de la molécule de phytate par la phytase et par une augmentation du degré d'alcalinité dans le tractus gastro-intestinal. En effet, les phytates, en complexant et en augmentant l'excrétion des minéraux (ex. Na, Ca, P, Fe ou Al) réduisent l'équilibre électrolytique en créant un environnement acidogène (Woyengo et al., 2009). Un superdosing de phytase peut avoir comme effet d'éliminer suffisamment de phytate pour réduire l'influence acidogène du phytate, ce qui aura pour conséquence d'augmenter le pH gastro-intestinal et l'excrétion du P soluble. Toutefois, les résultats de ces études suggèrent qu'une juste utilisation de la phytase (≤1000 FTU/kg), conjointement avec un abaissement de la teneur en P du régime permettrait de diminuer la part de P total et soluble excrétée.

1.3.2. Insolubilisation du P par traitement des litières

La fraction soluble du P dans les excréta des poulets correspond à une partie du P disponible de l'aliment et des pertes endogènes non digérées par les animaux. Cette forme de P correspond notamment à des sels d'acides orthophosphates (H_3PO_4) et de polyphosphates (Dao, 2004). Ces derniers peuvent s'ioniser en $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}, dépendamment du niveau du pH du milieu. Cette particularité offre aux anions PO_4^{3-} la possibilité de se complexer et de se précipiter avec d'autres nutriments pour devenir insoluble. C'est le cas de certains cations di et trivalents tels le calcium (Ca^{2+}), le fer (Fe^{2+}) et l'aluminium (Al^{3+}) (Ondreicka et al., 1971) (ex. équation 1, 2 et 3). Ces derniers sont d'ailleurs couramment utilisés sous forme de sels pour

précipiter le P et réduire la quantité émise par les stations d'épuration des eaux usées de la consommation humaine (Metcalf et Eddy, 2003).

- ✓ $Fe_2(SO_4)_3.2\,H_2O + 2PO_4^{\,3-} \rightleftharpoons 2Fe\,PO_4 + 3SO_4^{2-} + 2H_20$ *(Équation 1)*
- ✓ $3FeSO_4.7\,H_2O + 2PO_4^{\,3-} \rightleftharpoons Fe_3(PO_4)_2 + 3SO_4^{2-} + 21H_20$ *(Équation 2)*
- ✓ $Al_2(SO_4)_3.14\,H_2O + 2PO_4^{3}- + \rightleftharpoons 2AlPO_4 + 3SO_4^{2-} + 14\,H_2O$ *(Équation 3)*

En rapport à cette propriété, des systèmes de traitement des déjections animales par l'ajout des sels de Fe et d'Al sur la litière ont été développés dans les zones en excédent afin de réduire le transfert de P vers les cours d'eau. L'ajout des sels métalliques à base d'Al et de Fe tels le sulfate d'Al (alun) et le sulfate de Fe sur les litières a permis de réduire le lessivage du P de 87 % tout en améliorant les performances zootechniques des poulets (Moore et al., 1999). Des réductions de l'ordre de 63 % dans la proportion de P soluble de la litière ont été aussi obtenues lorsque le sulfate de Fe ($FeSO_4$) a été ajouté dans la litière (Shreve et al, 1995). Sims et Luka-McCafferty (2002), Warren et al (2008) ont observé qu'en plus de la réduction de la solubilité du P, l'ajout de l'alun sur la litière inhibe la minéralisation du P organique au cours du stockage et favorise la formation de composés organiques phosphorés alcalins qui rendent le P moins soluble et moins mobile dans le sol. Do et al (2005) ont montré que lorsque les litières des poulets sont traitées avec des composés comme le sulfate d'aluminium (alun), le chlorure d'Al et le sulfate de Fe et le chlorure de Fe, les pertes par volatilisation de l'azote ammoniacal (NH_3) et la proportion de P soluble de la litière sont diminuées de 97 et 90 %, respectivement.

Étant donné que les plantes absorbent le P sous la forme soluble, on peut douter qu'avec l'utilisation de ces litières traitées avec l'alun et le sulfate de Fe sur les parcelles agricoles, les plantes seraient capable de recevoir une quantité de P adéquate pour répondre à leurs besoins. Les travaux conduits par Warren et al (2006) ont testé l'impact d'une parcelle des litières traitées avec l'alun sur le rendement. Ces derniers ont conclu que les applications de litières traitées à l'alun n'affecteraient pas l'extraction du P par les cultures (Warren et al., 2006). Cependant, les quantités importantes de sels métalliques à ajouter pour précipiter le P engendrent des coûts considérables qui freinent l'utilisation de cette pratique (Moore et al, 2016). Par exemple, le prix de l'alun est aujourd'hui estimé à environ 150 dollars canadien/tonne (*Kemicore/Alibaba*). Pour une réduction de 87% de la proportion de P soluble dans la litière, Moore et al (1998) rapportent que 0,1 kg d'alun par oiseaux est nécessaire, ce qui pourraient représenter une dépense de plus de 2 885 565 dollars pour la production de poulets en 2016 au Québec si toutes les litières étaient traitées (192,371 millions de têtes d'oiseaux), soit de l'ordre de 15$/poulet.

Rapport-Gratuit.com

1.3.3. Insolubilisation du P dans le tube digestif à l'aide de sels métalliques

Considérant le coût élevé du recyclage du P chez les poulets de chair, la supplémentation dans les régimes alimentaires avec les mêmes cations divalents pourrait être une alternative afin de précipiter le P. Il est à noter que le sulfate de Fe est déjà ajouté dans les aliments pour couvrir les besoins des oiseaux. Plusieurs études ont montré que les complexes phosphates avec les sels métalliques se forment pour la plupart à des pH inférieurs à 7 (Moore et Miller, 1994; Metcalf et Eddy, 2003; Zeller et al.,2015), soit à peu près les conditions retrouvées dans la portion distale de l'intestin grêle chez le poulet (Herpol et Van, 1967; Engberg et al, 2002). Cependant, compte tenu que seul le P soluble dans le tube digestif peut être absorbé et disponible pour l'animal, il est essentiel que la précipitation du P soit effectuée en aval des sites d'absorption pour ne pas compromettre la biodisponibilité du P et des autres minéraux dans l'aliment. Ceci implique une bonne connaissance du métabolisme digestif des minéraux qui peuvent se complexer avec le P, le potentiel de la micro-encapsulation pour relarguer les cations métalliques (Al^{3+} et Fe^{2+}) ainsi que le comportement de chacun de ces cations dans les conditions particulières dans chaque segment du tube digestif des poulets.

1.3.3.1. Fer et aluminium dans l'alimentation des poulets

Le Fe joue un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions biologiques et intervient principalement dans la constitution de l'hémoglobine, de la myoglobine et des enzymes. Dans l'alimentation des poulets, il est requis en faible quantité (40-80 mg/kg de moulée; NRC, 1994) et son seuil de toxicité dépasserait 4 500 mg par kg de moulée (NRC, 1994). Le Fe apporté par l'alimentation des volailles peut-être sous deux formes, la forme heminique (coproduits animaux) et la forme non heminique (végétal et minéral). Cependant, en raison du coût élevé du Fe heminique, le Fe non heminique est plus répandu dans l'alimentation des poulets.

Dans l'estomac, le Fe non héminique est libéré des complexes auxquels il est lié dans les aliments par le milieu acide que les sécrétions gastriques (sécrétion pepsique, HCl) engendrent. Une fois libéré, ce dernier subira des transformations complexes (solubilisation et insolubilisation) avant d'être absorbé au niveau du duodénum et du jéjunum, puis transporté au niveau de la moelle osseuse et du foie où il sera accumulé pour la formation de l'hémoglobine (Richards et al., 1997; Tsay et al., 2010). Toutefois, il est essentiel de signaler que les composés ferreux (Fe^{2+}) sont mieux absorbés que les composés ferriques (Fe^{3+}) car le Fe divalent forme facilement des chélates solubles en milieu légèrement basique. Le Fe trivalent n'est soluble qu'à pH 5; il peut alors se complexer à certains peptides et polysaccharides qui peuvent être ensuite absorbés (Georgievskii et al., 2013). Sous l'action du pH, une partie du Fe^{3+} de l'aliment peut aussi être réduit en Fe^{2+} pour faciliter l'absorption de ce dernier (Richards et al.,1997). La part de Fe ferrique, qui n'est ni réduit ou ni chélaté par les peptides et les polysaccharides, forme des complexes insolubles et est peu ou pas absorbé (Dao et al., 2004).

Concernant l'Al, il a longtemps été reconnu comme un métal non essentiel et comme ayant une innocuité pour l'homme et les animaux du fait notamment de sa très faible absorption intestinale. Aujourd'hui, on retrouve certains des ingrédients à base d'Al comme agent affermissant dans plusieurs aliments pour la consommation humaine (Encyclopedia of food additives, 2007). Cependant, l'Al n'est pas apporté directement dans le régime des animaux. Il se retrouve dans les matières végétales et dans l'eau de boisson en petite quantité et possiblement par certaines sources de minéraux. Chez les poulets, bien qu'il existe peu d'études, le seuil de toxicité de l'Al serait de 1100 mg/kg (Huff et al, 1996). Une étude conduite chez le rat a montré que l'Al peut être absorbé tout le long de l'intestin et dans le colon (Whitehead et al., 1997). Huff et al (1998) ont montré que les os et la poitrine sont les principaux organes de réserves de l'Al.

D'une manière générale, les excès de Fe et d'Al chez les volailles se caractérisent par une diminution des performances de croissance des poulets et une efficacité d'utilisation du P réduite, une diminution de l'ingestion alimentaire et une mauvaise minéralisation osseuse (Elliot et Edwards, 1993; Huff et al., 1996; Cao et al., 1996). La principale raison qui explique ces effets négatifs proviendrait de la formation de complexes insolubles de P avec le Fe et l'Al. En effet, l'ajout de P dans l'aliment permettrait d'éviter les effets négatifs du Fe et de l'Al chez le poulet (Standish et al., 1971; Rosa et al., 1982). La formation de ces complexes diminue l'efficacité des enzymes phosphatases et phytases pour libérer le P, ce qui réduit la disponibilité du P pour le poulet (Deobald et Elvehjem, 1935; Qian et al., 1994).

1.3.3.2. Encapsulation des sels métalliques

Pour éviter la formation trop tôt des complexes entre le P avec les sels métalliques, la micro-encapsulation des sels métalliques permettrait de moduler leur temps de relargage (Madene et al., 2006). Les méthodes de séchage par refroidissement « Spray drying and chilling» sont les technologies les plus fréquemment utilisées pour l'encapsulation d'ingrédients pour produits alimentaires. La compagnie JEFO (St-Hyacinthe) utilise une technologie exclusive, développée au cours des 15 dernières années au Canada, basée sur la micro-encapsulation d'ingrédients alimentaires ou de substances à intérêt zootechnique pour des utilisations spécifiques à l'espèce animale ou au stade physiologique visé. Tout d'abord, le procédé consistait à encapsuler des ingrédients à l'échelle microscopique dans une matrice de matière grasse et de sels métalliques. Par la suite, en jouant par exemple sur la taille des particules de la matrice d'encapsulation ainsi que sur l'épaisseur de la couche déposée, il sera ainsi possible de moduler le temps de libération des ingrédients. Ceci permettra notamment la libération d'ingrédients actifs à des endroits ciblés du tube digestif des animaux d'élevage et l'insolubilisation du P non retenu par l'animal. La mise en œuvre d'une telle stratégie demande une bonne compréhension du devenir du P dans le tube digestif, mais aussi de la nature chimique des ingrédients.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Une étude conduite dans nos laboratoires chez les poissons a déjà montré qu'il était possible d'insolubiliser le P dans le tube digestif dans le cas de l'élevage de la truite arc-en-ciel, où les problèmes d'eutrophisation sont importants. En effet, l'alun et le sulfate de Fe encapsulé dans l'alimentation de la truite arc-en-ciel a permis de réduire jusqu'à 85% la proportion de P soluble contenu dans les fèces du poisson in vitro (Vandenberg, communication personnelle). Étant donné de la grande similarité entre les pH intestinaux retrouvés chez le poulet et les poissons, l'effet probable de l'inclusion de différents niveaux de ces ingrédients actifs dans le régime sur la proportion de P soluble, sur la digestibilité P et la performance des poulets de chair méritent d'être étudiés.

1.3.3.3. Principaux facteurs pouvant influencer l'insolubilisation du P par les sels métalliques

Les meilleures informations sur le potentiel de certains sels métalliques tels le sulfate du Fe ($Fe_2(SO_4)_3$ ou $FeSO_4$), l'alun ($Al_2(SO_4)_3$) et à fixer et précipiter le P provient des études réalisées sur le traitement des eaux usées et de la litière. Plusieurs études ont montré que dans les conditions de stœchiométrie, un cation métallique (Al^{3+} ou Fe^{2+} ou Fe^{3+}) réagit rapidement avec un anion phosphate (PO_4^{3-}) pour former des sels insolubles de phosphate de Fe ($FePO_4$) ou d'Al ($AlPO_4$) comme le montrent les équations 1 et 2 (Menar et Jenkens et al., 1970; Metcalf et Eddy, 2003; Dao et al., 2006). Toutefois, la stabilité des sels formés ($FePO_4$ ou $AlPO_4$) est fonction de plusieurs paramètres importants tels que la stœchiométrie , le ratio molaire métal/P (Moore et Miller, 1994; Dao, 2003), le pH (Maenz et al, 1999) et l'activité microbienne (Maguire et al., 2006).

Stœchiométrie

Les travaux conduits par Dao (2003) et Moore et Miller (1994) ont montré que la nature des sels métalliques utilisés pour précipiter le P affecte la solubilité des sels insolubles formés. En effet, en comparant l'efficacité de plusieurs sels de Fe et Al, ces auteurs ont démontré que les sels de Fe étaient plus efficaces que ceux d'Al pour précipiter P. De plus, dans une étude visant à réduire la solubilité du P de la litière des poulets, Moore et Miller (1994) ont montré que les complexes formés avec les sels ferreux ($FeCl_2$ ou $FeSO_4$) sont plus stables et varient peu avec le pH que ceux formés avec les sels ferriques ($FeCl_3$; $Fe_2(SO_4)_3$) (Figure 1.4.). La réactivité des cations Fe^{2+} et Fe^{3+} est fonction du pH. La solubilité minimale de la forme Fe^{2+} se trouve à pH 6,5-7, alors que le Fe^{3+} est plutôt acide (pH 5) (Moore et Miller; 1994). Les courbes d'évolution des sels Fe et Al ressemblent avec une parabole avec un minimum de solubilité qui se trouve à pH 5, 5 pour le Fe et 6,0 pour l'Al (Metcalf et Eddy, 2003). Dans tous les cas, de bonnes performances sont obtenues entre la plage de pH 5,5 à 7,0 pour les sels de Fe et Al (voir Figure 1.3).

Ratio molaire métal:P

Outre la stœchiométrie, la proportion des différents ions complexables dans le milieu peut aussi influencer le processus d'insolubilisation. Dans les usines de traitements des eaux usées, on suppose qu'une mole de Fe ou d'Al est suffisante pour réagir avec chaque mole de P dans le milieu, lorsque le P dissous se trouve à des concentrations dans l'eau de plus de 2mg/l (Metcalf et Eddy, 2003). Si c'est moins concentré, des doses supérieures de Fe et d'Al allant de 1,2 à 4,0 moles de Fe ou Al sont requises pour précipiter chaque mole de P dans le milieu (Hsu, 1976). Ceci s'explique par le fait qu'une partie des cations Al^{3+} ou Fe^{3+} vont se précipiter en parallèle avec des ions hydroxydes « OH^- » pour former des précipités d'hydroxyde de Fe et d'Al (e.g. $Fe(OH)_3$ ou $Al(OH)_3$) comme le montrent l'équation 3 et 4. Cette précipitation simultanée accroît la consommation de sels d'Al ou Fe et diminue la capacité des cations Al ou Fe à précipiter le P.

- ✓ $Al^{3+} + 3OH^- \rightleftharpoons Al(OH)_3 \downarrow$ (Équation 3)
- ✓ $Fe^{3+} + 3OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_3 \downarrow$ (Équation 4)

Toutefois, des concentrations trop élevées des cations Al ou Fe peuvent favoriser la solubilisation du P. Moore et Miller (1994) ont observé que la solubilité des complexes P des litières était minimale pour des ajouts de 10 à 20 g d'alun/kg de litière et de 35 à 55 g de sulfate de fer/kg de litière. Après cet optimum, la solubilité s'accroit au fur et à mesure qu'on augmente la dose de Fe et d'Al dans la litière, sauf pour le sulfate ferreux qui demeure sous forme insoluble (Figure 1.4). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que des fortes concentrations d'Al et de Fe dans la litière entraînent la formation d'acide chlorhydrique (HCl) ou sulfurique (H_2SO_4). La production de ces acides induit une augmentation du degré d'acidité dans le milieu, ce qui favoriserait la dissolution des phosphates organiques, et des complexes phosphates métalliques (Figure 1.3).

pH et devenir du P dans le tube digestif

L'utilisation du P par l'animal dépend également de sa solubilité qui est fonction du degré d'acidité de chaque portion du tube digestif. Chez les poulets, le pH dans les contenus digestifs diffère selon le compartiment digestif en passant d'un pH acide (2,0 à 4,1) dans la zone gastrique à un pH s'approchant de la neutralité dans l'intestin et les caeca (6,5-8) (Herpol et Van, 1967; Engberg et al, 2002). Le pH dépend des sécrétions digestives tout au long du tractus digestif. Toutefois, il a été rapporté que la composition et la forme de l'aliment peuvent influencer le pH des compartiments digestifs. En effet, Engberg et al., (2002) ont montré que le pH du contenu digestif du gésier est plus élevé pour les poulets nourris avec un aliment présenté sous forme de granulés par rapport ceux en farine (Tableau 1.1). Un aliment en farine provoquerait une stimulation plus efficace de la sécrétion de HCl dans le gésier, ceci en raison d'un temps de séjour plus long dans le gésier que les aliments granulés.

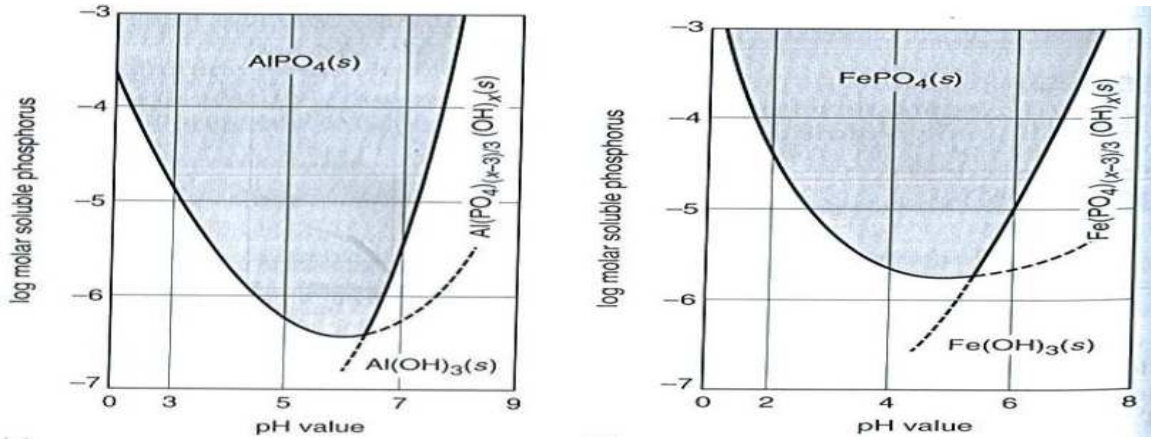


Figure 1.3. Évolution de la solubilité d'$AlPO_4$ et de $FePO_4$ en fonction du pH. (Tirées de Metcalf et Eddy, 2003)

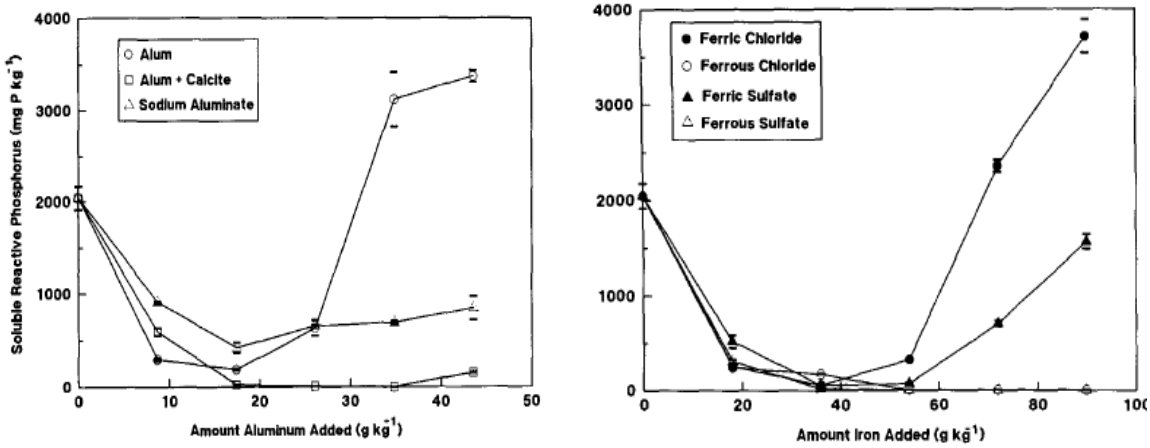


Figure 1.4. Évolution de la concentration en P soluble de la litière des poulets en fonction des niveaux des composés à base Fer et d'aluminium ajouté dans la litière des poulets de chair (Images tirées de Moore et Miller, 1994).

Certaines études ont également rapporté que l'ajout des fibres grossières pourrait entrainer une baisse de pH dans le gésier et dans les autres compartiments du tube digestif (Jimenez- Moreno et al., 2009). Tout comme l'aliment farineux, l'ajout des fibres grossières entraine un temps séjour plus long dans le gésier, ce qui favorise parallèlement l'activation de la pepsine et une augmentation accrue de la production HCl (Duke, 1997).

Tableau 1.1. pH des différents compartiments du tube digestif des poulets

Compartiment	**À jeun***	**Farine****	**Granulé****
Gésier	2,47-2,53	3,68	4
Duodénum	6,39-6,41	6,21	5,84
Jéjunum	6,58-6,62	6,17	6,05
Iléon	7,18-6,50	7,18	6,73
Rectum	6,98-7,02	6,47	5,97
Caeca	6,88-6,92	6,7	6,13

*Herpol et Van, 1967; **Engberg et al, 2002

Le devenir des différentes formes de P alimentaire au niveau digestif des poulets, se différencie dans le tractus intestinal selon trois compartiments fonctionnels : l'estomac, l'intestin grêle proximal et l'intestin grêle distal (Létourneau-Montminy et al., 2009). L'estomac est le principal siège d'hydrolyse des molécules de phytates par les phytases exogènes. De cette quantité de phytate hydrolysée, une partie sera absorbée au niveau du duodénum sous forme de $H_3PO_4^{3-}$ et l'autre partie continuera son chemin.
Dans le duodénum, la capacité du P à précipiter avec les ions métalliques divalents et trivalents tels l'Al^{3+} et le Fe^{2+} ou Fe^{3+}est faible, en raison des niveaux de pH faibles rencontrés dans ces segments du tube digestif. À la sortie de l'estomac, le pH gastrique augmente graduellement avec les sécrétions pancréatiques et biliaires. Les ions bicarbonates présents au niveau du lumen constituent un des principaux tampons du chyme et des digesta, ce qui favorisait par la suite une augmentation progressive du pH tout au long de l'intestin grêle.

Dans l'intestin grêle proximal, l'efficacité d'absorption est très importante lorsque le P est présent sous formes inorganiques HPO_4^- et $H_2PO_4^{2-}$ soluble et absorbable. Dans cette même portion du tube digestif, si les ions métalliques sont libres, le P solubilisé peut aussi être précipité dans l'intestin grêle sous forme de complexes insolubles, réduisant ainsi la disponibilité pour l'animal. L'intestin grêle distal est la portion du tube digestif attendu pour insolubiliser le P dans le tube digestif et sans compromettre la performance des poulets.

Activité microbienne

La présence d'une quantité notable de microorganismes dans le gros intestin, le colon et le caecum des animaux est bien connue pour transformer le P insoluble en P soluble (Fan et al, 2000; Sandberg et Andlid et al., 2002; Ajskaye et al, 2003). En effet, il a été démontré que certains microorganismes pathogènes du colon des poulets sont impliqués dans le processus de la solubilisation et de la dissociation des complexes phosphates (Maguire et al, 2006). Plusieurs études ont même mis en évidence une production de phytase par certains micro-organismes du colon tels les bactéries du genre *Bacillus subtilis* (Kerovuo et al.,1998), *Bacillus sp.* (Kim et al., 1998), *Pseudomonas sp* (Jorquera et al., 2001), *Lactobacilllus sp (*Askelson et al., 2014*)*. Ces microorganismes entrainent une augmentation de l'hydrolyse des phytates et des complexes phosphates métalliques dans le colon et dans le caecum, puis utilisent directement le P biodisponible dans les digesta pour leur croissance. Les mécanismes de dégradation des phytates et de dissolution des phosphates métalliques chez les micro-organismes reposent sur la production d'acides organiques et sur la libération des protons, qui à travers leurs groupements carboxyliques, forment des chélates avec les cations fixés aux phosphates insolubles, ce qui permet de les convertir en formes solubles (Mohammadi, 2012). Ces micro-organismes peuvent survivre pendant un certain temps dans la litière dépendamment, entre autres, des conditions d'entreposage, de la température et du type d'agent microbien excrété dans les déjections.

1.4. Hypothèses de la recherche

En rapport avec les faits évoqués dans la littérature scientifique ainsi que les résultats des essais conduits chez la truite arc-en-ciel, le présent projet de recherche partait de l'hypothèse générale selon laquelle la libération de sels métalliques de Fe et d'Al dans la partie distale du tube digestif permettrait d'insolubiliser le P et ainsi réduire le P soluble excrété sans modifier la rétention, la digestibilité du P, les performances de croissance et la minéralisation osseuse et n'induirait pas d'accumulations problématiques de minéraux dans les tissus corporels.

1.5. Objectifs

1.5.1. Objectif général

L'objectif général de cette maîtrise était d'introduire des ingrédients actifs tels les sels métalliques (sulfate de Fe et d'Al) encapsulé dans l'alimentation des poulets pour diminuer l'excrétion de P sous forme soluble et minimiser l'impact environnemental associé, et ce, sans modifier les paramètres d'efficacité d'utilisation du P et les performances des poulets.

1.5.2. Objectifs spécifiques

Cette maîtrise visait spécifiquement à :

- ✓ Évaluer l'impact des sels métalliques (sulfate de Fe et d'Al) encapsulé sur la rétention de P et la proportion de P soluble dans les fientes chez le poulet;
- ✓ Évaluer l'impact du sulfate de Fe encapsulé ou non sur la digestibilité jéjunale et des minéraux (Ca, Fe et P), les performances de croissance, la minéralisation osseuse, l'accumulation de Fe dans les reins, le foie et les litières et la proportion de P soluble dans les litières chez le poulet en croissance.

1.6. Références bibliographiques

Agra 2016, *Phosphates for animal Feed and nutrition*. Disponible sur.: http://foodchemicalnewspromo.agra-net.com/files/2016/04/AP-Phosphates-Animal-Feed-Nutrition-2016-MARKETING.pdf. (Page consultée le 16 mars 2013).

Ajskaye, A., M.Z. Fan, T. Archbold, R.R. Hacker, C.W. Forsberg, et J.P. Phillips. (2003). *Determination of true digestive utilization of phosphorus and the endogenous phosphorus outputs associated with soybean meal for growing pigs*. Journal Animal. Science. 81:2766–2775.

Angel R. C.,Wendy J. Powers, Todd J. Applegate, Nada M. Tamim et M. C. C. (2005). *Influence of Phytase on Water-Soluble Phosphorus in Poultry and Swine Manure.* Poultry Science, 34(6), 1359–1364. http://doi.org/10.3382/ps.0751359

Angel, R., Saylor, W. W., Mitchell, A. D., Powers, W., et Applegate, T. J. (2006). *Effect of Dietary Phosphorus, Phytase , and 25-Hydroxycholecalciferol on Broiler Chicken Bone Mineralization , Litter Phosphorus , and Processing Yields*. Poultry Science, 85, 1200–1211.

Applegate T. J., Joern, B. C., Nussbaum-Wagler, D. L., et Angel, R. (2003). *Water-soluble phosphorus in fresh broiler litter is dependent upon phosphorus concentration fed but not on fungal phytase supplementation*. Poultry Science, 82(6), 1024–1029. http://doi.org/10.1093/ps/82.6.1024

Askelson, T. E., Campasino, A., Lee, J. T., et Duong, T. (2014*). Evaluation of phytate-degrading Lactobacillus culture administration to broiler chickens*. Applied and environmental microbiology, 80(3), 943-950.

Babatunde, A. O., Zhao, Y. Q., Burke, A. M., Morris, M. A., et Hanrahan, J. P. (2009). *Characterization of aluminium-based water treatment residual for potential phosphorus removal in engineered wetlands*. Environmental Pollution, 157(10), 2830-2836.

Beaudet, P., I. Beaudin, A. Michaud et M. Giroux. 2008. *Le transport du phosphore*. Fiche technique no. 3. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 11. [En ligne].: https://www.irda.qc.ca/fr/publications/le-transport-du-phosphore/. (Page consultée le 16 mars 2013).

Beaulieu, R. (s. d.). *L'aspect réglementaire en agroenvironnement : concepts qui sous-tendent la réglementation et objectifs visés*. http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/prod-porcine/documents/BIO98-4.pdf (Page consultée le 16 mars 2013)

Bilodeau, R. 1998*. Le potentiel de réduction des rejets en azote et en phosphore : Production procine. Agri-Vision* - MAPAQ – CPAQ. Inc. 69-80.

Boiral, O. (2005). *Concilier environnement et compétitivité, ou la quête de l'éco-efficience.* Revue Française de Gestion, 31(158), 163–186. https://doi.org/10.3166/rfg.158.163-186

C. Roselina Angel, Wendy J. Powers,* Todd J. Applegate, Nada M. Tamim, et M. C. C. (2005). *Influence of Phytase on Water-Soluble Phosphorus in Poultry and Swine Manure*. Poultry Science, 34(6), 1359–1364. https://doi.org/10.3382/ps.0751359

Cao, J., Luo, X. G., Henry, P. R., Ammerman, C. B., Littell, R. C., et Miles, R. D. (1996). *Effect of dietary iron concentration, age, and length of iron feeding on feed intake and tissue iron concentration of broiler chicks for use as a bioassay of supplemental iron sources*. Poultry Science, 75(4), 495–504. http://doi.org/10.3382/ps.0750495

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2003). « *Charges fertilisantes des effluents d'élevage, cas des productions des volailles de chair* ». [En ligne]. [Http://pub.craaq.qc.ca/Transit/7-Volaille.pdf]. Page consultée le 17 octobre 2016.

Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (2006). Présentation du mémoire des Éleveurs de volaille du Québec. Disponible sur : http://www.caaaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/Memoires%20nationales%20Quebec/10-Q-Eleveurs_volailles_Qc.pdf. (Page consultée le 16 mars 2013).

Corpen. 2006. *Estimation des Rejets d'Azote, Phosphore, Potassium, Calcium, Cuivre et Zinc par les Elevages Avicoles*. Collection CORPEN, Paris

Correll, D. L. (1998). *The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review*. Journal of Environment Quality, 27(2), 261. http://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x

Courbebaisse, M., et Souberbielle, J. C. (2011). *Équilibre phosphocalcique : régulation et explorations*. Nephrologie et Therapeutique, 7(2), 118–138. https://doi.org/10.1016/j.nephro.2010.12.004

Dao, T. (2003). *Polyvalent cation effects on-inositol hexa-dihydrogenphosphate enzymatic dephosphorylation in dairy wastewater*. Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/32/2/694

Dao, T. H. (2004). *Organic ligand effects on enzymatic dephosphorylation of myo-inositol hexakis dihydrogenphosphate in dairy wastewater*. Journal of Environmental Quality, 33(1), 349–357. https://doi.org/10.2134/jeq2004.3490

Dao, T. H. (2006). 11 *Ligand Effects on Inositol Phosphate Solubility and Bioavailability in Animal Manures. Inositol phosphates*: Linking agriculture and the environment, 169.

Dao, T., Sikora, L., et Hamasaki, A. (2001). *Manure phosphorus extractability as affected by aluminum-and iron by-products and aerobic composting*. Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/30/5/1693

Davies M.I., Ritcey et G.M., Motzok I.: *Intestinal and alkaline phosphatase of chicks: Influence of dietary magnesium, calcium, phosphorus and vitamin D*. Poultry Science. 1970, 49, 1280-1286.

DeLaune, P., et Moore, P. (2004). *Development of a phosphorus index for pastures fertilized with poultry litter—Factors affecting phosphorus runoff*. Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/33/6/2183

Deobald, H. J., et Elvehjem, C. A. (1935). *The effect of feeding high amounts of soluble iron and aluminum salts*. American Journal of Physiology--Legacy Content, *111*(1), 118-123.

Dilger, R. N. (2004). *Estimation of True Phosphorus Digestibility and Endogenous Phosphorus Loss in Growing Chicks Fed Conventional and Low-Phytate Soybean Meals.* Poultry Science (2001), 661–668.

Do, J. C., Choi, I. H., et Nahm, K. H. (2005). Effects of Chemically Amended Litter on Broiler Performances, Atmospheric Ammonia Concentration, and Phosphorus Solubility in Litter. Poultry Science, 84(5), 679–686. Retrieved from http://search.proquest.com/docview/223155856?accountid=11233.

Dourmad, J.-Y. (2012). *Influence des pratiques d'élevage sur l'impact environnemental des systèmes de production porcine*. Journées Recherche Porcine, (44), 115–126.

Driver, J. P., Pesti, G. M., Bakalli, R. I., et Edwards, H. M. (2005). *Effects of calcium and nonphytate phosphorus concentrations on phytase efficacy in broiler chicks*. Poultry Science, 84(9), 1406–1417. http://doi.org/10.1093/ps/84.9.1406

Duke, Gary E. "*Gastrointestinal physiology and nutrition in wild birds*." Proceedings of the Nutrition Society 56.3 (1997): 1049-1056.

Rapport-gratuit.com

Edwards, D. R., et Daniel, T. C. (1993). *Effects of poultry litter application rate and rainfall intensity on quality of runoff from fescuegrass plots*. Journal of Environment Quality, 22(2), 361–365. http://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200020017x

Elliot, M. A., et Edwards, H. M. (1991). *Some effects of dietary aluminum and silicon on broiler chickens. Poultry Science*, *70*(6), 1390-1402.

Engberg, R. M., Hedemann, M. S., et Jensen, B. B. (2002). *The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity in the digestive tract of broiler chickens*. British poultry science, 43(4), 569-579.

Espagnol, S., et Leterme, P. (2010). *Élevages et environnement*. Éditions Quae.France Paris. 260 pg

Estevez, Bernard, et Gérald Domon. "*Les enjeux sociaux de l'agriculture durable: un débat de société nécessaire?*." Le Courrier de l'environnement de l'INRA 36.36 (1999): 97-106.

Fan, M.Z., T. Archbold, K. Mead, et Y. Gao. 2000. *Partitioning various forms of phosphorus in the distal ileal digesta and feces*. Canadian journal Animals. Society. 80:780 (abstract).

Fernández, J. (1995). *Calcium and phosphorus metabolism in growing pigs*. III. A model resolution. Livestock Production Science, 41(3), 255-261.

Flaten, D., Snelgrove, K., et Halket, I. (2003). *Acceptable phosphorus concentrations in soils and impact on the risk of phosphorus transfer from manure amended soils to surface waters*. Review of Literature. Retrieved from http://www.prairieswine.com/pdf/2898.pdf

Groupe Agéco (2014) : «*structures des exploitations agricoles au Québec : Évolution structurelle et comparaison avec certains concurrents*». Disponible sur]. [Http://www.aginac.com/client/publications/RapportSynthese_EvolutionEtDiversiteModelesExploitationsAgricoles_140602.pdf.]. Page consulté le 15 février 2017

Herpol, C., et Van Grembergen, G. (1967). *La signification du pH dans le tube digestif de gallus domesticus*. In Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique (Vol. 7, No. 1, pp. 33-38). EDP Sciences.

Hsu, P. H. (1976). *Comparison of iron (III) and aluminum in precipitation of phosphate from solution*. *Water Research*, *10*(10), 903-907.

Huff, W. E., Moore, P. a, Waldroup, P. W., Waldroup, a L., Balog, J. M., Huff, G. R., et Raboy, V. (1998). Effect of dietary phytase and high available phosphorus corn on broiler chicken performance. Poultry Science, 77(12), 1899–1904. http://doi.org/10.1093/ps/77.12.1899

Hurwitz, S., et Bar, A. (1965). *Absorption of calcium and phosphorus along the gastrointestinal tract of the laying fowl as influenced by dietary calcium and egg shell formation*. The Journal of Nutrition, 86(840), 433–438.

Jamieson, A., Madramootoo, C. A., et Enright, P. (2003*). Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec*. Canadian Biosystems Engineering, *45*, 1-1.

Jiménez-Moreno, E., González-Alvarado, J. M., Lázaro, R., et Mateos, G. G. (2009). *Effects of type of cereal, heat processing of the cereal, and fiber inclusion in the diet on gizzard pH and nutrient utilization in broilers at different ages.* Poultry Science, 88(9), 1925-1933.

Jorquera, M., MARTíNEZ, O. S. C. A. R., Maruyama, F., Marschner, P., et de la Luz Mora, M. (2008). *Current and future biotechnological applications of bacterial phytases and phytase-producing bacteria*. Microbes and environments, 23(3), 182-191.

Kerovuo, J., Lauraeus, M., Nurminen, P., Kalkkinen, N., et Apajalahti, J. (1998). *Isolation, characterization, molecular gene cloning, and sequencing of a novel phytase from Bacillus subtilis*. Applied and environmental microbiology, 64(6), 2079-2085.

Kim, Y. O., Kim, H. K., Bae, K. S., Yu, J. H., et Oh, T. K. (1998). *Purification and properties of a thermostable phytase from Bacillus sp. DS11*. Enzyme and Microbial Technology, 22(1), 2-7.

Klis, J. Van der, et Versteegh, H. (1996). *Phosphorus nutrition of poultry*. Retrieved from http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB9712275

Klopfenstein, T., et Angel, R. (2002). *Animal diet modification to decrease the potential for nitrogen and phosphorus pollution.* Faculty Papers and …. Retrieved from http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1518etcontext=animalscifacpub

Les Éleveurs de Volailles du Québec (2015). *«Statistiques sur la production de volailles au Québec pour l'année 2015* ». [En ligne]. [http://volaillesduquebec.qc.ca/elevage/portrait/statistiques/statistiques-2015]. Page consulté le 15 février 2017.

Lescoat, P., Travel, A., et Nys, Y. (2005). *Lois de réponses des volailles de chair à l'apport de phosphore*. Productions animales, 18(3), 193–201.

Letourneau Montminy, M. P. (2009). *Modélisation de métabolisme phosphocalcique chez le porc et le poulet en croissance* (Doctoral dissertation, Institut national agronomique Paris-Grignon).

Létourneau-Montminy, M. P., Jondreville, C., Sauvant, D., et Narcy, A. (2012). *Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase*. Animal science, 6(10), 1590-1600.

Létourneau-Montminy, M. P., Narcy, A., Lescoat, P., Magnin, M., Bernier, J. F., Sauvant, D., et Pomar, C. (2011). *Modeling the fate of dietary phosphorus in the digestive tract of growing pigs*. *Journal of Animal Science*, *89*(11), 3596-3611.

Leytem, a B., Kwanyuen, P., et Thacker, P. (2008). *Nutrient excretion, phosphorus characterization, and phosphorus solubility in excreta from broiler chicks fed diets containing graded levels of wheat distillers grains with solubles.* Poultry Science, 87(12), 2505–2511. https://doi.org/10.3382/ps.2008-00052

Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., et Desobry, S. (2006). *Flavour encapsulation and controlled release - A review.* International Journal of Food Science and Technology, 41(1), 1–21. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x

Maenz, D. D., Engele-Schaan, C. M., Newkirk, R. W., et Classen, H. L. (1999). *The effect of minerals and mineral chelators on the formation of phytase-resistant and phytase-susceptible forms of phytic acid in solution and in a slurry of canola meal.* Animal Feed Science and Technology, 81(3–4), 177–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00085-1

Maguire, R. O., Crouse, D. A., et Hodges, S. C. (2007*). Diet modification to reduce phosphorus surpluses: A mass balance approach*. Journal of environmental quality, *36*(5), 1235-1240.

Maguire, R. O., Hesterberg, D., Gernat, A., Anderson, K., Wineland, M., et Grimes, J. (2006). Liming poultry manures to decrease soluble phosphorus and suppress the bacteria population. Journal of Environmental Quality, 35(3), 849–57. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0339

Maguire, R. O., Sims, J. T., McGrath, J. M., et Angel, C. R. (2003). *Effect of phytase and vitamin D metabolite (25OH-D3) in turkey diets on phosphorus solubility in manure-amended soils*. Soil Science. http://doi.org/10.1097/00010694-200306000-00004

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Maguire, R., Dou, Z., et Sims, J. (2005). *Dietary strategies for reduced phosphorus excretion and improved water quality*. Journal of environnemental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/34/6/2093

Maguire, R., et Sims, J. (2004). *Influence of phytase addition to poultry diets on phosphorus forms and solubility in litters and amended soils*. Journal of environnemental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/33/6/2306

Martinez Amezcua, C., Parsons, C. M., et Noll, S. L. (2004). *Content and relative bioavailability of phosphorus in distillers dried grains with solubles in chicks*. Poultry Science, 83(1972), 971–976. https://doi.org/10.1093/ps/83.6.971

McGrath, J. M., Sims, J. T., Maguire, R. O., Saylor, W. W., Angel, C. R., et Turner, B. L. (2005). *Broiler diet modification and litter storage: impacts on phosphorus in litters, soils, and runoff*. Journal of Environmental Quality, 34(5), 1896–909. https://doi.org/10.2134/jeq2004.0413

Menar, A. B., et Jenkins, D. (1970). *Fate of phosphorus in waste treatment processes: Enhanced removal of phosphate by activated sludge*. Environmental science and technology, 4(12), 1115-1121.

Meschy, F., Jondreville, C., Dourmad, J. Y., Narcy, A., et Nys, Y. (2008). Maitrise des rejets de phosphore dans les effluents d'élevage. Productions Animales, 21(1), 79–86.

Metcalf, E. E., et Eddy, H. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. *New York: McGRaw*.

Miles, D. M., Moore, P. a, Smith, D. R., Rice, D. W., Stilborn, H. L., Rowe, D. R. et Simmons, J. D. (2003). Total and water-soluble phosphorus in broiler litter over three flocks with alum litter treatment and dietary inclusion of high available phosphorus corn and phytase supplementation. Poultry Science, 82(10), 1544–1549. https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1544

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (2011). « *Monographie de l'industrie de la volaille au Québec*. ». [En ligne]. [Https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Volaille.pdf.]. Page consulté le 15 février 2017.

Ministe□re du De□veloppement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2016). *Guide de re□fe□rence du Re□glement sur les exploitations agricoles*. 182 pages. [En ligne]. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/guide-reference-REA.pdf (page consulte□e le jour/mois/anne□e).

Ministère Du Développement durable, De L'environnement Et De la Lutte Contre Les Changements climatiques. (2013). « *Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec* ». [En ligne]. [Http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation_Rivieres-Fleuve.htm]. Page consultée le 27 mai 2016.

Mohammadi, K. (2012). *Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production.* Resources Environmental, 2(1), 80-85.

Mohanna, C., et Nys, Y. (1999). *Changes in zinc and manganese availability in broiler chicks induced by vegetal and microbial phytases*. Animal Feed Science and Technology, 77(3–4), 241–253. http://doi.org/10.1016/S0377-8401(98)00254-5

Moore, P. A., Daniel, T. C., et Edwards, D. R. (1999). *Reducing phosphorus runoff and improving poultry production with alum*. Poultry Science, 78(5), 692-698.

Moore, P. A., et Miller, D. M. (1994*). Decreasing phosphorus solubility in poultry litter with aluminum, calcium, and iron amendments*. Journal of Environmental Quality, 23(2), 325-330.

Moore, P., et Miller, D. (1994). *Decreasing phosphorus solubility in poultry litter with aluminum, calcium, and iron amendments.* Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/23/2/JEQ0230020325

Mozaffari, M., et Sims, J. T. (1994). *Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture*. Soil Science, 157(2), 97-107.

NRC (Ed.). (1994). *Nutrient Requirements of Poultry (9ieme Edit*). The national academies press. http://doi.org/10.17226/2114

Ondreicka, R., Kortus, J., et Ginter, E. (1971). *Aluminum, its absorption, distribution, and effects on phosphorus metabolism.* Intestinal Absorption of Metal Ions. Trace Elements and Radionuclides. Oxford: Pergamon, 293-305.

Pellerin, S., et Nesme, T. (n.d.). *Flux de phosphore associés à l'élevage et conséquences sur la fertilité phosphatée des sols: analyse à plusieurs échelles*. Researchgate.net. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Nesme/publication/291456876_A_multiscale_analysis_of_livestock-produced_phosphorus_fluxes_and_their_consequences_for_soil_fertility/links/56d9681408aebabdb40f6fbc.pdf

Plumstead, P. W., Leytem, A. B., Maguire, R. O., Spears, J. W., Kwanyuen, P., et Brake, J. (2008). *Interaction of Calcium and Phytate in Broiler Diets. 1. Effects on Apparent Prececal Digestibility and Retention of Phosphorus*. Poultry Science, 87(3), 449–458. https://doi.org/10.3382/ps.2007-00231

Pointillart, A. (1994). *Phytates, phytases: leur importance dans l'alimentation des monogastriques*. INRA Productions animales, 7(1), 29-39.

Powers, W., et Angel, R. (2008). *A Review of the Capacity for Nutritional Strategies to Address Environmental Challenges in Poultry Production*. Poultry Science, 87(10), 1929–1938. http://doi.org/10.3382/ps.2008-00090

Qian, H., Kornegay, E. T., et Denbow, D. M. (1997). *Utilization of phytate phosphorus and calcium as influenced by microbial phytase, cholecalciferol, and the calcium: total phosphorus ratio in broiler diets.* Poultry Science, 76(1), 37-46.

Roberson, K., et Edwards, H. (1994). *Effects of 1, 25-dihydroxycholecalciferol and phytase on zinc utilization in broiler chicks*. Poultry Science. Retrieved from http://ps.oxfordjournals.org/content/73/8/1312.short

Rosa, I. V., Henry, P. R., et Ammerman, C. B. (1982*). Interrelationship of dietary phosphorus, aluminum and iron on performance and tissue mineral composition in lambs.* Journal of animal science, 55(5), 1231-1240.

Rousseau, X., Valable, A. S., Létourneau-Montminy, M. P., Même, N., Godet, E., Magnin, M., et Narcy, A. (2016). *Adaptive response of broilers to dietary phosphorus and calcium restrictions*. Poultry science, 95(12), 2849-2860.

Rutherfurd, S. M., Chung, T. K., et Moughan, P. J. (2002). *The effect of microbial phytase on ileal phosphorus and amino acid digestibility in the broiler chicken*. British Poultry Science, 43(4), 598–606. http://doi.org/10.1080/0007166022000004516.

Sandberg, A. S., et Andlid, T. (2002). *Phytogenic and microbial phytases in human nutrition*. International journal of food science et technology, 37(7), 823-833.

Sauveur, B. (1989*). Phosphore phytique et phytases dans l'alimentation des volailles.* INRA Productions animales, 2(5), 343–351.

Schröder, B., Breves, G., et Rodehutscord, M. (1996). *Mechanisms of intestinal phosphorus absorption and availability of dietary phosphorus in pigs*. *DTW.* Deutsche tierarztliche Wochenschrift, *103*(6), 209-214.

Selle, P. H., et Ravindran, V. (2007). Microbial phytase in poultry nutrition. Animal Feed Science and Technology, 135(1–2), 1–41. http://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.010

Sharpley, A and Moyer, B. (2000). Phosphorus forms in manure and compostand their release during similated rainfall. Journal of Environmental Quality, 29, 1462–1469.

Sharpley, A. N., et Smith, S. J. (1985). *Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils.* Soil Science Society of America Journal, 49(1), 127-130.

Sharpley, A., et Meyer, M. (1994). Minimizing Agricultural Nonpoint-Source Impacts: A Symposium Overview. Journal of Environmental Quality, 23(1), 1–2.

Shreve, B., et Moore, P. (1995). *Reduction of phosphorus in runoff from field-applied poultry litter using chemical amendments*. Journal of environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/24/1/JEQ0240010106

Sims, J. T., et Luka-McCafferty, N. J. (2002). On-farm evaluation of aluminum sulfate (alum) as a poultry litter amendment. *Journal of Environmental Quality*, *31*(6), 2066-2073.

Smith, D. R., Moore, P. A., Miles, D. M., Haggard, B. E., et Daniel, T. C. (2004). *Decreasing phosphorus runoff losses from land-applied poultry litter with dietary modifications and alum addition*. Journal of environmental quality, 33(6), 2210-2216.

Standish, J. F., Ammerman, C. B., Palmer, A. Z., et Simpson, C. F. (1971*). Influence of dietary iron and phosphorus on performance, tissue mineral composition and mineral absorption in steers*. Journal of animal science, 33(1), 171-178.

Statistiques Canada (2016). Agriculture et Agroalimentaire Canada. « *L'industrie du poulet en un clin d'œil*. ». Disponible sur : [Http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/statistiques-et-information-sur-les-marches/par-produit-secteur/volaille-et-oeufs/information-sur-le-marche-de-la-volaille-et-des-oeufs-industrie-canadienne/poulet/?id=1384971854392. Page consulté le 19 février 2017].

Suttle, N. F. (2010). Mineral nutrition of livestock. Cabi.https://doi.org/10.1079/9781845934729.0000

Tasistro, A. S., Cabrera, M. L., et Kissel, D. E. (2004). *Water soluble phosphorus released by poultry litter: Effect of extraction and time after application.* Nutrient cycling in agroecosystems, 68(3), 223-234.

Trans, G., et Skiba, F. (2005). *Variabilité inter et intra matière première de la teneur en phosphore total et phytique et de l'activité phytasique*. Productions Animales-Paris-Institut National De La Recherche Agronomique-, 18(3), 159.

UPA, 200. Portrait agroenvironnement des fermes du Québec

Vadas, P. a, Meisinger, J. J., Sikora, L. J., McMurtry, J. P., et Sefton, E. (2004). *Effect of poultry diet on phosphorus in runoff from soils amended with poultry manure and compost.* Journal of Environmental Quality, 33(5), 1845–54. http://doi.org/10.2134/jeq2004.1845

Vahl, H. A., et van 'T Klooster, A. T. (1987). *Dietary iron and broiler performance*. British Poultry Science, 28(4), 567–76. https://doi.org/10.1080/00071668708416992

Van der Klis, J. D., Versteegh, H. A., Simons, P. C., et Kies, A. K. (1997). *The efficacy of phytase in corn-soybean meal-based diets for laying hens*. Poultry Science, 76(11), 1535-1542.

Waldroup, P. W. (1999a). *Nutritional approaches to reducing phosphorus excretion by poultry*. Poultry Science, 78(5), 683–691. http://doi.org/10.1093/ps/78.5.683

Warren, J. G., Keahey, D., Penn, C. J., Phillips, S. B., et Mullins, G. L. (2006). *Environmental and production consequences of using alum-amended poultry litter as a nutrient source for corn*. Journal of Environmental Quality, 35(1), 172–182. http://doi.org/10.2134/jeq2004.0418

Warren, J. G., Penn, C. J., McGrath, J. M., et Sistani, K. (2008). *The impact of alum addition on organic P transformations in poultry litter and litter-amended soil.* Journal of Environmental Quality, 37(2), 469–76. http://doi.org/10.2134/jeq2007.0239

Wasserman, R. H., et Taylor, A. N. (1973). *Intestinal absorption of phosphate in the chick: effect of vitamin D3 and other parameters.* The Journal of nutrition, 103(4), 586-599.

Whitehead, M. W., Farrar, G., Christie, G. L., Blair, J. A., Thompson, R. P., et Powell, J. J. (1997). *Mechanisms of aluminum absorption in rats*. The American journal of clinical nutrition, 65(5), 1446-1452.

Yan, F., et Waldroup, P. W. (2006). *Nonphytate phosphorus requirement and phosphorus excretion of broiler chicks fed diets composed of normal or high available phosphate corn as influenced by phytase supplementation and vitamin D source*. International Journal of Poultry Science, 5(3), 219–228. http://doi.org/10.3923/ijps.2006.219.228

Zhao, Y. Q., Zhao, X. H., et Babatunde, A. O. (2009). *Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: long-term trial*. Bioresource technology, 100(2), 644-648.

Richards, M. P. (1997). *Trace mineral metabolism in the avian embryo*. *Poultry science*, *76*(1), 152-164.

Georgievskii, V. I., Annenkov, B. N., et Samokhin, V. T. (2013). *Mineral nutrition of animals: studies in the agricultural and food sciences.* Elsevier

CHAPITRE II

Réduction de l'excrétion de phosphore soluble par l'addition de sulfate de fer et d'aluminium encapsulés chez le poulet afin de diminuer les risques d'eutrophisation associés à cette production

Floradin P.*, Guay F.*, Létourneau-Montminy M.P.*†

*Département des sciences animales, Université Laval, Québec City, QC G1V-0A6, Canada.
piterson.floradin.1@ulaval.ca ,

Résumé

Une étude a été conduite afin d'évaluer le potentiel de sulfate de fer (Fe) et d'aluminium (Al) encapsulés à insolubiliser le phosphore (P) dans l'intestin chez le poulet en croissance. Ces derniers ont été ajoutés à raison de quatre doses pour un total de 8 traitements alimentaires (ratio Fe ou Al : P ; 6:1, 10:1, 14:1, 18:1), introduit dans témoin négatif (C-) qui était également testé seul et comparé à un aliment commercial (C+) en termes d'excrétion de P soluble et de rétention de P et de calcium (Ca) chez les poulets. Les ratios molaires Fe ou Al : P ont été déterminés à partir de la concentration maximale en P soluble dans l'iléon et les caeca de poulets nourris avec un aliment commercial qui contenait 6 g de P total /kg. Chaque régime alimentaire a été attribué à 6 cages de 6 poulets de souche Cobb 500, élevés du jour 14 au jour 28. Les oiseaux ont été pesés aux jours 14 et 28 et les fientes ont été collectées totalement du jour 24 au jour 28. Les résultats montrent que les performances de croissance, l'excrétion et la rétention du P et du Ca n'étaient pas affectées par l'ajout de Fe ou d'Al dans la ration des poulets. L'ajout de sulfate de Fe diminuait l'excrétion du P soluble de façon linéaire (P < 0,001) et quadratique (P< 0.001) montrant que la dose 2 conduit à une diminution maximale de la solubilité du P (-23% par rapport C-) suivi des doses 3 et 4 (-9% par rapport à C-). Pour l'alun, l'effet était également linéaire (P<0,001) et quadratique (P=0,001) avec des diminutions de 18, 10, 18 et 13% avec l'augmentation de la dose par rapport au C-. En conclusion, l'ajout du sulfate de Fe et d'Al encapsulés peut réduire l'excrétion P soluble dans les fientes sans modifier les performances des poulets, indiquant le P est insolubilisé après les sites d'absorption.

Mots clés : Phosphore soluble ; fer ; aluminium ; poulet ; excrétion.

Abstract

An experiment was conducted to evaluate the potential of iron (Fe) and aluminium (Al) sulfate encapsulated to insolubilize phosphorus (P) in the gastrointestinal tract of broiler. These ingredients were added at 4 doses for a total of 8 treatments (ratio Fe or Al: P, 6: 1, 10: 1, 14: 1, 18: 1), introduced into a negative control (C-), which was also compared to a commercial feed (C +) in terms of water-soluble P (WSP) excretion and phosphorus (P) and calcium (Ca) retention. The molar ratio Fe or Al: P were determined from the maximum concentration WSP in the ileum and caeca of broilers fed with a commercial diet. Six males broiler of 14 d-old, were assigned to 1 of 10 diets with 6 cages per treatment. Birds were weighted at d 14 and 28 and total excreta were collected from d 24 to 28. Diet did not significantly affect growth performance. P and Ca ingested, retained, and excreted as well as retention efficiency were not modified by the addition of iron sulfate or alum. Iron sulfate addition showed a linear ($P < 0.01$) and quadratic ($P < 0.01$) response on the WSP excretion indicating that dose 10:1 resulted in the maximum WSP reduction (−24% relative to C-) followed by the doses 14:1 and 18:1 (-9 % relative to C-). Al supplemented diets also showed linear (P = 0, 001) and quadratic effect (P = 0.014) with WSP decreases of 18, 10, 18, and 13% with the increase of the dose compared with C-. In conclusion, WSP excretion is decreased as expected and this without modifying growth performances and P retention indicating that P is insolubilized after the main absorption sites.

Keys Words: Water Soluble-Phosphorus; Iron sulfate; Alum; Broiler; Excretion

2.1. Introduction

La compétitivité des productions avicoles est aujourd'hui challengée par l'éradication des antibiotiques dans l'alimentation et le respect de l'environnement (Elwinger et al., 2016). Ce dernier objectif, particulièrement marqué dans les pays émergents, est notamment attribuable aux problèmes environnementaux associés aux rejets de phosphore (P) qui sont de plus en plus préoccupants. En effet, des rejets excessifs de P dans les effluents contribuent à la prolifération des cyanobactéries ou algues bleues vertes phénomène qui peut évoluer en eutrophisation des eaux de surface dans les zones à fortes concentrations d'élevages (Correll, 1998). L'incidence de ce phénomène est proportionnelle au pourcentage de P sous forme soluble dans les effluents (Sharpley, 1999).

Les poulets de chair utilisent peu le P phytique des grains sans une hydrolyse enzymatique. Ils excrètent ainsi près des 2/3 des apports alimentaires de P, dont 20 à 60% seraient sous forme soluble (Angel et al., 2005). Une des pratiques les plus utilisées pour réduire l'apport de P et en limiter les rejets est l'ajout d'une enzyme exogène dans l'aliment, la phytase. Cette dernière permet de libérer les groupements phosphates liés au P sous forme phytique présent dans les végétaux, qui sinon, ne peuvent être absorbés et sont excrétés dans les fèces (Selle et Ravindran, 2007). Malgré la généralisation de l'utilisation de phytase, près de 50% du P ingéré par les monogastriques est excrété dans les effluents (Bougouin et al., 2014). Certaines études ont, de plus, montré une augmentation de la proportion de P rejeté sous forme soluble dans les excréta chez le poulet lors d'addition de phytase particulièrement lorsque des marges de sécurité sont appliquées sur le P alimentaire lors de la formulation (Applegate et al., 2003; Angel et al., 2005; Leytem et al., 2008).

Le P soluble correspond notamment à des sels d'acides orthophosphates (H_3PO_4) et polyphosphates. Ces derniers peuvent s'ioniser facilement en $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-}, dépendamment du pH du milieu, et ainsi interagir avec d'autres molécules comme les protéines et certains cations divalents pour former des complexes insolubles (Dao et al., 2001). C'est le cas particulier des cations di et trivalents de calcium (Ca^{2+}), de Fe (Fe^{2+}) et d'aluminium (Al^{3+}) (Ondreicka et al., 1971). L'utilisation de sels métalliques, notamment les sulfates de Fe et d'Al, demeure une pratique généralisée pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles afin d'isoler le P dans la partie solide (Metcalf et Eddy, 2003). Les complexes insolubles entre les cations métalliques et le P se forment pour la plupart à des pH proches de la neutralité (pH<7), soit les conditions retrouvés dans la portion distale de l'intestin grêle des poulets (Maenz et al., 1999).

La supplémentation dans les régimes alimentaires avec les mêmes cations divalents pourrait être une alternative pour diminuer la part de P soluble des effluents. Étant donné que seul le P soluble dans le tube digestif peut être absorbé par les volailles, il est essentiel que la précipitation du P soit effectuée en aval des sites d'absorption pour ne pas modifier les performances. L'encapsulation du Fe et l'Al dans une matrice de

Rapport-Gratuit.com

lipides permettrait de libérer le Fe et Al après le site d'absorption du P dans la partie distale de l'intestin grêle pour éviter une insolubilisation avant ou au niveau des sites d'absorption (Schrooyen et al., 2001).

Le présent essai avait donc comme objectif de tester le potentiel de l'alun et du sulfate de Fe encapsulé ajoutés à l'aliment de poulet en croissance à réduire l'excrétion de P soluble dans les fientes sans modifier la rétention de P et les performances de croissance.

2.2. Matériels et méthodes

L'étude a été réalisée en deux étapes. Un essai préliminaire in vitro a évalué le potentiel du sulfate de Fe et de l'Al à insolubiliser le P dans des digesta prélevés chez le poulet en croissance. Suite aux résultats de cet essai, l'impact de ces ingrédients introduits à plusieurs doses dans l'aliment des poulets a été évalué sur la proportion de soluble des fientes et les performances des poulets.

2.2.1. Essai préliminaire

Cinquante poulets de 29 jours d'âge ont été choisis au hasard et abattus par dislocation cervicale selon la procédure en vigueur au Centre de Recherche en Sciences Animales de Deschambault (CRSAD). Les poulets étaient alimentés à volonté avant d'être abattus. Les aliments qu'ils consommaient contenaient 6 g de P total/kg. Les différents segments du tube digestif, soit le duodénum, le jéjunum proximal et distal (jéjunum divisé en 2), l'iléon proximal et distal (iléon divisé en 2) et les caeca, ont ensuite été isolés, sectionnés et leur contenu a été prélevé à l'aide d'un «flushing» à l'eau distillée. Les volumes de digesta collectés par poulet étaient d'environ 7 ml dans le duodénum, 25 ml dans chacune des portions de jéjunum, 25 ml dans l'iléon proximal et 35 ml dans la partie distale et enfin 35 ml dans les caeca. Les digesta ont été mélangés par section et le pH a été mesuré. Les volumes de digesta collectés ont été ensuite centrifugés et le surnageant, considéré comme la phase soluble, a été prélevé. Le reste a été lyophilisé pour des analyses ultérieures. La concentration en P total des digesta a été obtenue suite à une digestion acide avec HNO_3 et HCl (50%) et mesuré par chromatographie ionique (Dionex ICS-3000). Le $FeSO_4$ et l'$Al_2(SO_4)_3$ ont été ajoutés dans le surnageant des digesta de l'iléon distal et ceaca compte tenu qu'ils constituent les principaux sites en amont des sites d'absorption visés pour l'insolubilisation le P.

Le pH initial et final suite à l'ajout des composés dans les solutions de digesta a été mesuré. Un temps de transit correspondant à ce qui est attendu in vivo a été utilisé comme durée de l'étude, soit 35 minutes (Shires et al., 1987; Van der Klis et al., 1990). Les échantillons ont été maintenus à 41 degrés Celsius et agités durant les tests toujours pour imiter le plus possible les conditions retrouvées in vivo. Les ratios Fe et Al par rapport au P qui ont été testés ont été estimés à partir de données de la littérature sur le traitement des eaux usées et en considérant la concentration en P de nos digesta.

2.2.2. Essai principal

2.2.2.1. Aliments expérimentaux

Dix régimes expérimentaux, à base de maïs et de tourteau de soja, ont été formulés de façon à satisfaire l'ensemble des besoins nutritionnels des poulets âgés de 14 à 28 jours, à l'exception de ceux de P et de Ca (Lesson et Summers, 2005; NRC, 1994; Tableau 2.1). Les régimes expérimentaux étaient un contrôle positif (C+) apportant tous les éléments nutritifs dont 0,45 % de P disponible et 0,80 % de Ca et un régime témoin négatif (C-) avec moins de P disponible (0,32 %) et de Ca (0,46%); 3 à 10). Deux sels métalliques, le sulfate de Fe et l'alun, ont été encapsulés dans une matrice de lipides et ajoutés à quatre doses de 16, 278, 390 et 501 mg/kg (ratio Fe ou Al : P ; 6:1, 10:1, 14:1, 18:1) dans le C- pour un total de 8 traitements alimentaires. Les doses de Fe et d'Al encapsulés apportaient respectivement 16, 26, 36 et 46 mg/kg de Fe et 7, 12, 17, 22 mg/kg d'Al dans les aliments. Les ratios molaires Fe ou Al : P ont été déterminées à partir de la concentration maximale en P soluble dans l'iléon et les caeca de poulets alimentés avec un aliment commerciaux contenant 6 g de P total /kg (Tableau 2.1). Des billes lipidiques ont été ajoutées dans le C+ et le C- pour assurer l'équivalence énergétique. Les aliments étaient présentés en farine et dépourvus d'antibiotiques et de phytase microbienne.

2.2.2.2. Animaux et procédure expérimentale

Les oiseaux utilisés dans cette expérience ont été élevés conformément aux recommandations du *Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Research and Teaching* (FASS, 2010). Au total, 540 poulets de chair mâles (Cobb 500) âgés d'un jour ont été obtenus d'une écloserie commerciale, élevés dans des parcs et nourris avec un régime commercial jusqu'au jour 10. Au jour 10, trois cent soixante poulets, pesant en moyenne 352 ± 27 g, ont été placés dans des cages (24 x 30 x 16 pouces) avec des panneaux amovibles en dessous où ils se sont vus attribuer l'un des 10 traitements alimentaires distribués au hasard entre les 60 cages pour un total de 6 cages par traitement alimentaire. Chaque cage était équipée d'une mangeoire rectiligne et d'un abreuvoir à tétine avec bol. Suite à une période d'adaptation aux aliments et à la vie en cage d'une durée de 4 jours, les oiseaux ont reçu les aliments expérimentaux du jour 14 jusqu'au jour 28 jours. La température ambiante initiale a été fixée à environ 32 °C et progressivement réduite de 2 à 3 °C jusqu'à atteindre 21 °C à la fin de l'élevage. La lumière a été maintenue 20 h par jour pendant la première semaine et réduite jusqu'à 16 h à la fin de la deuxième semaine et maintenue jusqu'à la fin de l'expérience.

Le poids vif a été mesuré aux jours 14 et 28. Les refus d'aliments par cage ont été mesurés à 21, 24 et 28 jours. Un essai de collecte totale de fientes a été réalisé pour déterminer les coefficients de rétention de P et de Ca (%) et le P et Ca retenus (g/jour) entre les jours 24 et 27. Les excréta ont été collectées à 10 h tous les matins sur des plateaux métalliques placés en dessous des cages permettant la collecte totale des fientes et la prise alimentaire a été déterminée par cage.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Tableau 2.1. Ingrédients et composition chimique de base des aliments expérimentaux

Ingrédients, %	Témoin positif	Témoin négatif
	C+[1]	C-[2]
Maïs	43,90	43,90
Tourteau de soja, 48 %	26,30	26,30
Blé	10,00	10,00
Drêches de maïs	7,50	7,50
Huile végétale	6,46	3,78
Amidon de maïs	1,85	5,83
Phosphate monocalcique[3]	1,27	0,57
Carbonate de calcium	1,24	0,65
DL-Methionine	0,16	0,16
Bicarbonate de sodium	0,35	0,35
Dioxyde de titane	0,30	0,30
Sel de sodium	0,10	0,10
L-Lysine HCL	0,27	0,27
L-Threonine	0,05	0,05
Prémix	0,25	0,25
Composition chimique théorique		%
Énergie métabolisable, Mcal/kg	3,08	3,08
Protéines brutes	22,7	21,5
Calcium	0,85	0,48
P total	0,57	0,47
P phytique [4]	0,21	0,21
P disponible[5]	0,36	0,26
Fe, mg/kg	200	200
Al, mg/kg	0	0

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (NRC, 1994). [2]C-= Témoin négatif avec des niveaux de P et Ca réduits.[3] Biophos qui contient : 18 % de Ca, 21 % P disponible et 0,16 % fluor (F). [4]P phytique : valeur théorique attendue .[5]P disponible : calculé selon les tables INRA-AFZ, 2002).

2.2.2.3. Analyses chimiques

Après la détermination de la teneur en matière sèche (étuve à 100°C pendant 16 heures ; *AOAC International, 2005*; *method no: 930.15*) et la lyophilisation (Lyophilisateur Pilotes Genesis, Virtis Wizard 2.0, *Thermo scientific, US*) des excréta, les échantillons d'aliments et d'excréta ont été réduits en cendres à 600°C pendant 12 h dans un four à moufle. Les cendres ont été digérées et solubilisées dans l'acide chlorhydrique (HCl, 3M) et l'acide nitrique (HNO_3, 6M), la concentration en P total des échantillons a été déterminée selon la méthode colorimétrique métavanadate au spectrophotomètre (GENESYS 10S UV-Vis, Thermo scientifique, US). Le Ca, le Fe et l'Al ont été dosés par spectrométrie d'émission optique à plasma couplé par induction (ICP-OES) Agilent Technologies 700 Series ICP-OES (In-house WCM Assay method). La proportion de P soluble dans les excréta a été déterminée en agitant 1 g d'excréta sec dans 250 ml d'eau déminéralisée pendant deux heures et en filtrant à travers une membrane de 0.45 µm, puis en utilisant le réactif molybate-métavanadate pour précipiter et doser le P disponible dans la solution tel que décrit par (Vadas et Kleinman, 2006).

2.2.2.4. Calcul et analyse statistiques

Le gain moyen quotidien (GMQ) et la consommation moyenne journalière (CMJ) ont été calculés pendant toute la période expérimentale. Le GMQ a été obtenu en mesurant la différence entre les mesures finales et initiales et en divisant par le nombre de jours de la deuxième phase d'alimentation. L'indice de conversion alimentaire (IC) a été estimé pour chaque cage comme le rapport entre CMJ et GMQ. La cage était l'unité expérimentale.

Il y avait 6 répétitions par traitement, disposées selon un plan en bloc complet randomisé avec 6 blocs. Les contrastes polynomiaux orthogonaux ont été utilisés pour étudier: 1) la différence entre PC et NC, 2) les traitements NC et Fe avec effet linéaire (Lin), quadratique (Qua) et cubique (Cub) et 3) les traitements NC et Al avec linéaires (Lin), quadratique (Qua) et cubique (Cub) en utilisant la procédure MIXED de SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, 2009). Les différences ont été considérées comme significatives lorsque P <0,05, et les tendances ont été notées lorsque P <0,10.

2.3. Résultats

2.3.1. Essai préliminaire

Les résultats de l'étude in vitro montrent que le pH des digesta intestinal augmente du duodénum à l'iléon distal (6,1 à 7,0), pour ensuite légèrement diminuer dans les caeca (6,4). La concentration en P total a diminué du duodénum à l'iléon distal (- 80%; Tableau 2.2). Le P dans la phase soluble suivait quant à lui la même tendance avec une diminution de 84% entre le duodénum et l'iléon distal (0,1537 à 0,0245 g/kg). Parallèlement à l'augmentation du pH, la proportion de et la quantité de P insoluble augmentaient au fur et à mesure qu'on avance dans l'intestin grêle. Les concentrations en P insoluble évoluaient de 2% dans le duodénum à 22 % dans l'iléon terminal et 19% dans les caeca (Tableau 2.3).

Tableau 2.2: pH, teneur en P soluble et insoluble des digesta intestinaux avant l'ajout des composés encapsulés.

Segments	pH	P total g/kg	P soluble g/kg	P insoluble[1] g/kg	P insoluble %	P soluble %
Duodénum	6,11	0,1563	0,1537	0,0026	1,67	98,3
Jéjunum proximal	6,28	0,1085	0,1038	0,0047	4,33	95,7
Jéjunum distal	6,40	0,0855	0,0799	0,0056	6,60	93,4
Iléon proximal	6,60	0,0520	0,0452	0,0068	13,1	86,9
Iléon distal	6,97	0,0314	0,0245	0,0069	22,0	78,0
Ceaca	6,39	0,0456	0,0369	0,0088	19,2	80,8

[1]P insoluble : estimé à partir de la différence entre le P total et le P soluble dans l'eau.

L'effet de l'augmentation du ratio Al : P sur l'insolubilisation du P montre que l'insolubilisation augmentait de façon similaire entre les deux segments, mais était plus importante dans l'iléon distal atteignant plus de 90% (Figure 2.1). Le sulfate de Fe se comportait quant à lui de la même façon dans les deux segments et arrivait à insolubiliser également jusqu'à plus de 90% du P dans les digesta (Figure 2.2).

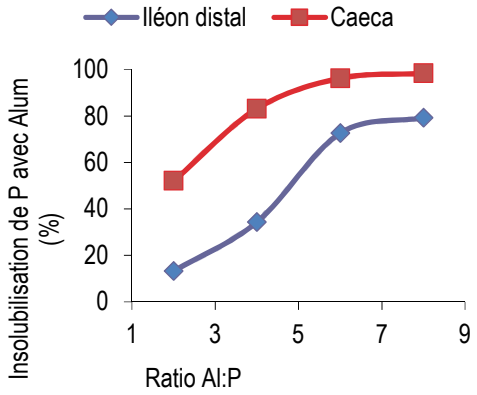


Figure 2.1. Insolubilisation de phosphore par l'alun en fonction du ratio Al :P

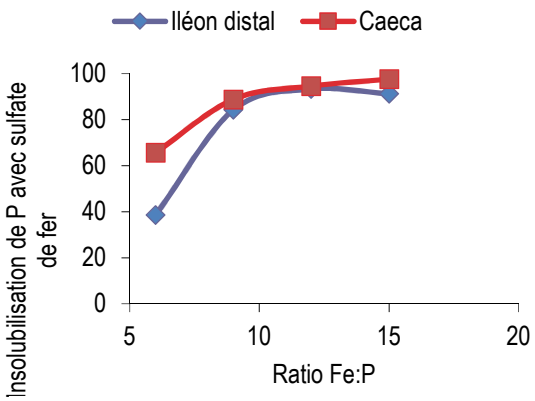


Figure 2.2. Insolubilisation de phosphore par le sulfate de fer en fonction du ratio Al :Fe

Au niveau de l'iléon distal, les niveaux d'insolubilisation optimale ont été obtenus avec le ratio molaire Al ou Fe/P 6 :1 et 12 :1, respectivement. Pour ces mêmes ratios molaires, le pH des digesta était dimunué de 7,2 à 3,2 par l'ajout d'alun et de 7,2 à 4,3 par l'ajout de sulfate de Fe (Tableau 2.3).

Tableau 2.3. Insolubilisation de phosphore par différentes molécules dans l'iléon distal in vitro

	Ratio molaire Al ou Fe :P	Durée, min	pH départ	pH fin	Insolubilisation P, %
$Al_2(SO_4)_3$	3:1	35	7.62	7.3	66
$Al_2(SO_4)_3$	6:1	35	7.62	5.6	74
Fe SO_4	6:1	35	7.62	7.2	66
Fe SO_4	12:1	35	7.62	4.2	83

2.3.2. Essai principal

Les teneurs en Ca et P des traitements alimentaires analysés étaient plus élevées que celles attendues dans les aliments C+ et C-, mais conformes aux valeurs attendues pour les autres traitements bien qu'une légère variation ait été observée entre les traitements (Tableau 2.4). Les teneurs en Fe analysées étaient plus faibles que celles attendues en se basant sur la composition théorique des ingrédients C+ (-12 %) et C- (-27 %), alors que celles d'Al étaient environ 95 % plus élevées. Pour les autres traitements, la différence obtenue par rapport au C- était proportionnelle à l'augmentation des doses d'Al ajoutées dans l'aliment, alors que l'effet dose était présent seulement pour les deux premières doses de Fe ajoutées (147 vs 204 et 225).

Tableau 2.4. Teneur en calcium, en phosphore total en aluminium et en fer des aliments expérimentaux

Traitements	Ca total	P total	Al	Fe
	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg
C+[1]	9,4	7,5	129	176
C-[2]	4,4	5,3	97	147
Fe 16	4,6	5,4	88	204
Fe 26	4,8	5,5	89	225
Fe 36	4,9	5,5	85	195
Fe 46	4,4	5,1	94	220
Al 12	4,5	5,1	101	199
Al 17	4,5	5,2	135	197
Al 22	4,6	5,5	162	217
Al 27	4,2	5,5	166	195

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (NRC, 1994). [2]C-= Témoin négatif avec des niveaux de P et Ca déficients. Les résultats sont exprimés en g /kg de matière humide. Toutes les analyses ont été effectuées en duplicata et les niveaux de variations entre les duplicatas étaient inférieurs à 5 %.

2.3.2.1. Performance des oiseaux

Les résultats montrent que les performances de croissance n'étaient pas modifiées par l'ajout de sulfate de Fe ou d'Al (Tableau 2.5). Le GMQ était augmenté chez les poulets recevant le régime C+ comparé au régime C- (P = 0,03), alors que le poids vif initial et final, la CMJ, le GMQ étaient similaires entre le C+ et le C-.

2.3.2.2. Bilan en P et Ca

L'ingestion de Ca et P était plus faible chez les C- par rapport aux C+ (P < 0,001; Tableau 2.6). Il en était de même pour l'excrétion et la rétention (P <0,001) et le coefficient de rétention du Ca (P = 0,03) alors qu'une tendance était notée pour celui du P (P = 0,098). Un effet quadratique du Fe pour le P ingéré (P < 0,001) et le Ca ingéré (P <0,001) a montré que les doses 2 et 3 avaient des valeurs plus élevées. L'excrétion de Ca et P et le coefficient de rétention n'étaient pas modifiés par l'ajout de Fe et d'Al. Le Ca ingéré, excrété, retenu ainsi que le coefficient de rétention n'étaient pas influencés par l'ajout d'Al. Le P ingéré a évolué de façon linéaire (P=0,058) et le P excrété n'est pas modifié. Le P retenu et le coefficient de rétention évoluent de façon linéaire (respectivement, P = 0,01 et P = 0,06), quadratique (P < 0,001) et cubique (respectivement, P = 0,01 et P = 0,03) montrant que les doses 3 et 4 avaient des rétentions plus élevées.

2.3.2.3. Bilan fer et aluminium

Le Fe ingéré et excrété a diminué chez les C- par rapport au C+ (respectivement, P < 0,001; P = 0,004; Tableau 2.7), alors que le Fe retenu et le coefficient de rétention étaient similaires. Le Fe ingéré évoluait de façon linéaire (P < 0.001), quadratique (P < 0,001) et cubique (P < 0,001) avec l'augmentation de la dose de Fe. Un effet linéaire du Fe a été obtenu pour la quantité de Fe excrété (P < 0,001; Tableau 2.7). Le Fe retenu

Tableau 2.5. Performance de croissance des poulets du jour 14 au jour 28

	Traitements alimentaires											Probabilités						
													effet Fe			effet Al		
Paramètres	C+[1]	C-[2]	$FeSO_4$ 6:1	$FeSO_4$ 10:1	$FeSO_4$ 14:1	$FeSO_4$ 18:1	Alun 6:1	Alun 10:1	Alun 14:1	Alun 18:1	ETR[3]	C+ vs C-	Lin	Qua	Cub	Lin	Qua	Cub
PV initial, g	368	367	368	369	368	370	368	369	368	367	11,3	0,942	0,880	1,000	0,913	0,991	0,919	1,000
PV final, g	1500	1434	1448	1461	1445	1452	1452	1440	1473	1457	32,5	0,101	0,719	0,682	0,777	0,445	0,841	0,817
CMJ, g/j	127	122	123	123	122	124	124	121	126	124	2,9	0,190	0,696	0,765	0,568	0,425	0,962	0,840
GMQ, g/j	81	76	77	78	77	77	77	76	79	78	1,7	0,027	0,672	0,572	0,735	0,296	0,960	0,750
IC, g/g	1,57	1,60	1,59	1,57	1,58	1,61	1,61	1,60	1,60	1,60	0,016	0,067	0,933	0,053	0,562	0,638	0,971	0,847

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (NRC, 1994). [2]C-= Témoin négatif avec des niveaux de P et Ca déficients. [3]ETR= Écart type résiduel. Les différences ont été considérées significatives lorsque P <0,05, et les tendances ont été notées lorsque P <0, 10.

Tableau 2.6. Résultats des bilans de rétention de calcium et de phosphore du jour 24 au jour 28

	Traitements alimentaires											Probabilités						
													effet Fe			effet Al		
Paramètres	C+[1]	C-[2]	$FeSO_4$ 6:1	$FeSO_4$ 10:1	$FeSO_4$ 14:1	$FeSO_4$ 18:1	Alun 6:1	Alun 10:1	Alun 14:1	Alun 18:1	ETR[3]	C+ vs C-	Lin	Qua	Cub	Lin	Qua	Cub
Bilan Ca																		
Ingéré, g/oiseau	5,30	2,45	2,55	2,69	2,68	2,43	2,50	2,42	2,59	2,38	0,002	<0,001	0,561	<0,001	0,087	0,768	0,161	0,146
Excréta, g/ oiseau	1,62	0,88	0,97	0,96	0,98	0,92	0,99	0,87	1,00	0,85	0,05	<0,001	0,547	0,167	0,869	0,746	0,148	0,794
Retenu, g/oiseau	3,68	1,57	1,58	1,72	1,70	1,50	1,51	1,55	1,59	1,53	0,05	<0,001	0,980	0,002	0,049	0,975	0,958	0,207
Rétention, en % ingéré	69,5	64,1	61,9	64,2	63,4	62,0	60,4	63,9	61,5	64,3	1,7	0,03	0,608	0,805	0,331	0,785	0,264	0,724
Bilan P																		
Ingéré, g/oiseau	4,23	2,97	2,99	3,03	3,03	2,83	2,93	2,85	3,06	3,06	0,05	<0,001	0,176	0,017	0,221	0,060	0,075	0,331
Excréta, g/ oiseau	2,16	1,61	1,64	1,66	1,63	1,64	1,80	1,64	1,71	1,62	0,06	<0,001	0,776	0,664	0,805	0,740	0,143	0,298
Retenu, g/oiseau	2,11	1,40	1,40	1,41	1,45	1,23	1,17	1,26	1,40	1,49	0,05	<0,001	0,044	0,016	0,069	0,007	<0,001	0,013
Rétention, en % ingéré	49,8	46,5	46,1	47,9	47,1	42,8	39,5	43,3	45,0	47,8	1,54	0,098	0,148	0,208	0,200	0,065	<0,001	0,031

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (NRC, 1994). [2]C-= Témoin négatif avec des niveaux de P et Ca déficients. [3]ETR= Écart type résiduel. Les différences ont été considérées significatives lorsque P <0,05, et les tendances ont été notées lorsque P <0, 10.

et le coefficient de rétention évoluent de façon quadratique (respectivement, P < 0,001 et P < 0,001) et cubique (respectivement, P < 0,001 et P = 0,0035) avec l'augmentation de la dose de Fe. Le Fe excrété n'était pas influencé par l'Al, alors qu'une augmentation linéaire (P < 0,001) et quadratique (respectivement, P < 0,001 et P= 0,002; P= 0,022) a été obtenue pour le Fe ingéré, retenu et le coefficient de rétention.

L'Al ingéré, excrété et retenu était plus faible chez les oiseaux consommant le C- comparés aux C+ (P < 0,001), alors que le coefficient de rétention était similaire. L'Al ingéré, retenu et le coefficient de rétention ont évolué de façon linéaire (P < 0,01) et cubique (P < 0,01) avec l'augmentation des doses d'Al. L'Al ingéré, excrété, retenu et le coefficient de rétention n'étaient pas influencés par le Fe. Un effet linéaire de l'Al a été obtenu pour la quantité d'Al excrété (P=0,02) montrant une augmentation proportionnelle aux doses d'alun encapsulés ajoutés dans l'aliment.

2.3.2.4. Excrétion du P soluble

Les résultats montrent que l'ajout du sulfate de Fe encapsulé dans le régime des oiseaux a diminué l'excrétion du P soluble en proportion du P total de façon linéaire (P < 0,001; tableau 2.8) et quadratique (P < 0,001), montrant que la dose 2 conduit à une diminution maximale de la solubilité du P (-24% par rapport C-) suivi des doses 3 et 4 (-12 et 11% par rapport à C-). Pour l'Al, l'effet était également linéaire (P < 0,001) et quadratique) avec des diminutions de 18, 10, 18 et 13% avec l'augmentation de la dose par rapport au traitement C-.

2.4. Discussion

2.4.1. Essai préliminaire

Les résultats de l'étude in vitro montrent que le pH des contenus intestinaux augmente du duodénum à l'iléon distal. Ceci est en accord avec la littérature (Shafey et al., 1991; Mabelebele et al., 2014) et s'explique par le fait que le proventricule-gésier est une section très acide qui acidifie le bol alimentaire qui transite vers le duodénum et est progressivement tamponné par les sécrétions pancréatiques et biliaires qui font augmenter le pH en descendant vers l'iléon (Hurwitz et Bar, 1971). Les résultats montrent également que les digesta des caeca ont une acidité supérieure à celle de l'iléon, effet qui semblerait lié à la production d'acides gras volatiles par les micro-organismes qui colonisent ces segments (Mabelebele et al., 2014).

La concentration en P soluble dans les contenus des différents segments intestinaux diminue de façon importante soit de 84% entre le duodénum et l'iléon distal. Cette disparition est probablement le résultat de l'absorption du P soluble, seule forme absorbable par le poulet (Nelson, 1967).

Tableau 2.7. Résultats des bilans de rétention de fer et d'aluminium du jour 24 au jour 28

Paramètres	Traitements alimentaires										SEM	Probabilités						
												C+ vs C-	effet Fe			effet Al		
	C+	C-	$FeSO_4$ 6:1	$FeSO_4$ 10:1	$FeSO_4$ 14:1	$FeSO_4$ 18:1	Alum 6:1	Alum 10:1	Alum 14:1	Alum 18:1			Lin	Qua	Cub	Lin	Qua	Cub
Bilan Fe																		
Ingéré, g/oiseau	0,091	0,075	0,103	0,115	0,098	0,113	0,100	0,097	0,111	0,100	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,572
Excréta, g/ oiseau	0,077	0,064	0,077	0,076	0,085	0,094	0,077	0,068	0,069	0,066	0,003	0,004	<0,001	0,975	0,159	0,631	0,056	0,066
Retenu, g/oiseau	0,014	0,011	0,025	0,038	0,013	0,019	0,023	0,028	0,042	0,033	0,003	0,395	0,677	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	0,093
Retention, en % ingéré	15,5	14,7	24,6	33,5	13,0	16,8	23,8	29,1	37,9	33,6	2,6	0,845	0,363	<0,001	0,004	<0,001	0,022	0,260
Bilan Al																		
Ingéré, g/oiseau	0,081	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,056	0,073	0,091	0,093	0,0001	<0,001	0,087	<,001	0,800	<,001	0,759	<0,001
Excréta, g/ oiseau	0,041	0,025	0,028	0,027	0,027	0,027	0,030	0,028	0,031	0,030	0,002	<0,001	0,467	0,2072	0,421	0,02	0,141	0,336
Retenu, g/oiseau	0,042	0,030	0,027	0,028	0,028	0,028	0,027	0,046	0,061	0,064	0,001	<0,001	0,038	<,0001	0,481	<,001	0,082	<,001
Retention, en % ingéré	50,9	55,4	49,4	50,7	50,6	51,8	47,2	62,6	66,6	68,3	1,9	0,300	0,153	0,001	0,490	<,001	0,223	<,001

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (NRC, 1994). [2]C-= Témoin négatif avec des niveaux de P et Ca déficients. [3]ETR= Écart type résiduel. Les différences ont été considérées significatives lorsque P <0,05, et les tendances ont été notées lorsque P <0, 10.

Tableau 2.8. Effet des traitements alimentaires sur la solubilité dans l'eau du phosphore excrété par les poulets des jours 24 à 28

Paramètres	Traitements alimentaires										ETR[3]	Probabilités						
													effet Fe			effet Al		
	C+[1]	C-[2]	FeSo4 6:1	FeSo4 10:1	FeSo4 14:1	FeSo4 18:1	Alun 6:1	Alun 10:1	Alun 14:1	Alun 18:1		C+ vs C-	Lin	Qua	Cub	Lin	Qua	Cub
P total, g/oiseau	2,16	1,61	1,64	1,66	1,63	1,64	1,80	1,64	1,71	1,62	0,06	<0,001	0,776	0,664	0,805	0,740	0,143	0,298
P soluble, g/oiseau	1,05	1,03	0,99	0,78	0,90	0,91	0,87	0,88	0,83	0,86	0,03	0,656	0,004	0,002	0,665	0,001	0,012	0,464
Ratio P sol: P tot	0,49	0,64	0,60	0,45	0,55	0,55	0,49	0,53	0,49	0,53	0,02	<,001	<,001	<,001	0,807	<0,001	<,0001	0,06

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (NRC, 1994). [2]C-= Témoin négatif avec des niveaux de P et Ca déficients. [3]ETR= Écart type résiduel. Les différences ont été considérées significatives lorsque P <0,05, et les tendances ont été notées lorsque P <0, 10.

Parallèlement à cette disparition, les résultats montrent que la proportion de P insoluble dans les segments intestinaux augmente au fur et à mesure que l'on avance dans l'intestin grêle en raison de l'absorption accrue P du soluble et de la remontée de pH qui favoriserait l'insolubilisation du P en particulier avec la formation de complexes insolubles impliquant des cations divalents (Ca, Al et Fe) (Tyler, 1946).

Tel qu'attendu, l'ajout des composés de Fe et d'Al a augmenté significativement la proportion de P insoluble dans les digesta in vitro. Cette augmentation semblerait par ailleurs être proportionnelle à la concentration des cations et inversement proportionnelle au pH de la solution conformément à de précédentes études (Moore et Miller, 1994; Smith et Moore, 2001). Le pH est en effet un des facteurs importants qui gouvernent la formation des complexes Fe ou Al phosphates et l'insolubilisation du P (Maenz et al.,1999). Dans cette étude, le pH des digesta était diminué par l'ajout d'alun de 7,2 à 3,2 et de 7,2 à 4,3 par l'ajout de sulfate de Fe. Ceci basé sur la production d'acide sulfurique à partir de la dissolution de l'alun et du sulfate de Fe. En effet, ces derniers sont des sels acides, chaque mole dissoute dans le milieu libère 6 ions hydrogènes (H^+), qui vont évoluer vers la formation d'acide sulfurique (H_2SO_4) (Toor et al., 2005). La production de ces acides induit une diminution du degré d'alcalinité dans la solution pour créer un milieu plus propice à la formation des complexes Al ou Fe-phosphates et l'insolubilisation du P.

2.4.2. Essai principal

Les résultats du présent essai montrent une diminution du GMQ chez les oiseaux alimentés avec les régimes carencés en P et Ca (C-, Fe et Al) comparativement à ceux nourris avec le régime équilibré (C+). Cet effet est possiblement attribuable à une carence engendrée par la baisse de l'apport en P dans les régimes C-, le NRC (1994) recommandant une concentration de 0,45% de P non phytique dans l'aliment des poulets pour assurer une croissance optimale. La teneur en énergie était également plus faible (100 Kcal) ce qui pourrait avoir diminuée les performances (Cheng et al., 1997).

Les résultats montrent que les performances de croissance n'ont pas été modifiées par l'ajout de sulfate de Fe dans l'aliment. Bien que seulement quelques études aient été menées sur les besoins en Fe des poulets de chair, ils ont été établis entre 80 mg/kg et 136 mg/kg (Davis et al., 1968, McNaughton et Day, 1979; Ma, et al., 2016). Dans l'expérience actuelle, le régime de base utilisé fournissait 147 ppm de Fe et les niveaux dans les aliments pour les doses de Fe ajoutées étaient plus élevés. L'absence d'effet de Fe sur les performances de croissance est en désaccord avec les résultats récents d'Akter et Graham (2017) qui rapportent que l'inclusion de Fe (sous forme de $FeSO_4$ non protégé) à 40 ppm dans un régime de base contenant 80 ppm de Fe altère le GMQ et l'IC. D'autres études ont montré que l'ajout d'Al dans l'aliment des poulets diminue les performances de croissance et la rétention du P, mais à des niveaux de 2000 ppm (Elliot et Edwards, 1991) et 9000 ppm (Huff et al.,1996). Cet effet négatif proviendrait de la formation de complexes

Rapport-Gratuit.com

insolubles de P et d'Al puisque l'ajout de P dans l'aliment permet de contrer l'effet négatif de l'Al toujours chez le poulet (Deobald et Elvehjem, 1935). L'encapsulation a probablement permis la libération de Fe et d'Al plus loin dans le tube digestif limitant de tels effets négatifs sur les performances.

La rétention totale de P et Ca n'a pas été altérée par le régimes Fe suggérant encore l'efficacité de l'encapsulation à libérer les éléments dans la partie distale de l'iléon. De même, une amélioration linéaire et quadratique de la rétention totale de Fe a été obtenue pour les doses de Fe ajoutées dans l'aliment, indiquant que l'encapsulation n'a pas nuis à l'absorption du Fe. Selon Zimmerman (2004), l'encapsulation des ingrédients peut aider à surmonter plusieurs défis majeurs dans la nutrition humaine et animale, notamment en réduisant les interactions négatives entre les ingrédients actifs avec les nutriments importants dans le régime des animaux.

Une augmentation quadratique de la rétention totale de P a été obtenue pour les doses d'Al ajoutées dans l'aliment. Cette amélioration de la rétention de P peut probablement être attribuée aux concentrations alimentaires de P plus élevés dans les aliments supplémentés avec les doses d'alun pour une raison inconnue. L'ajout d'alun encapsulé dans l'aliment a également amélioré la rétention du Fe, montrant que les doses 3 et 4 ont engendrées une amélioration numériquement similaire à la troisième dose de Fe ajouté dans l'aliment. Une première explication pourrait provenir du fait que l'alun apporte une quantité notable de Fe dans l'aliment, ce qui confirme les concentrations élevées de Fe obtenues dans les aliments supplémentés. Cette augmentation de rétention vis-à-vis des doses d'alun ajoutées peut probablement être aussi le résultat d'une complexation plus rapide des phosphates ou des phytates de préférence avec les ions Al^{3+} plutôt que les ions Fe^{2+}, facilitant l'absorption du Fe.

Selon Ma et al (2012), l'excrétion de Fe chez le poulet augmente lorsque la concentration est supérieure à 249 mg/kg. Dans la présente étude, le fait qu'on avait eu un effet sur l'excrétion pour les doses de Fe ajoutés dans l'aliment prouve que les ingrédients ont été libérés en aval des sites d'absorption ou que l'absorption était saturée, favorisant la formation des complexes entre les ions Fe^{2+} et le PO_4^{3-} principalement au niveau des caeca où la baisse du pH est propice à la formation des complexes $Fe_3(PO_4)^2$. La même observation a été également faite pour les doses d'alun ajoutées.

L'augmentation de la concentration alimentaire du sulfate de Fe sur le P soluble s'est traduite par des effets linéaires et quadratiques, montrant que les doses 2, 3 et 4 engendrent les plus fortes diminutions (respectivement, 45%, 55% et 55%) comparativement à la dose 1 (60%). L'augmentation de la solubilisation aux doses 3 et 4 comparativement à la dose deux proviendrait des variations observées dans la quantité de Fe ingéré compte tenu de variations dans les concentrations alimentaires de Fe. Pour l'Al, un effet quadratique montre que les 4 doses réduisent de la même façon le P soluble (51% en moyenne) par rapport à C- (63%).

Ces résultats sont en accord avec les données obtenues dans notre étude préliminaire et dans d'autres études réalisées in vitro dans laquelle le sulfate de Fe et l'alun ont été ajoutés directement sur les litières (Moore et Miller, 1994; Dao et al., 2003; Toor et al., 2005). Moore et Miller (1994) ont montré que la proportion du P soluble des litières diminue progressivement avec l'augmentation des concentrations d'alun et de sulfate de Fe ajoutées. Ceci basé sur la formation de complexes Fe ou Al et phosphate tel que bien documenté et utilisé pour le traitement des eaux usées (Metcalf et Edy, 2003). Toutefois, il semblerait que l'insolubilisation soit plus efficace avec les doses de Fe encapsulés comparées à celles d'alun dans la présente étude. Une corrélation quadratique entre la proportion de P insolubilisé et la quantité de Fe ajouté montre que plus de 77% de la proportion de P insolubilisé pourrait être expliquée par la quantité de Fe ingéré par les poulets sous forme encapsulé (Figure 2.3).

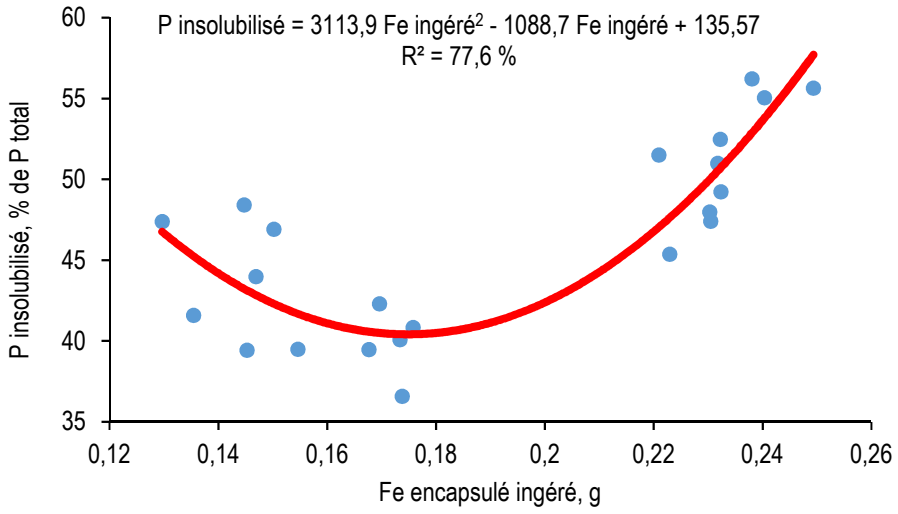


Figure 2.3. Relation entre la quantité de P insolubilisé et la quantité de Fe ingéré par les poulets sous forme encapsulée

2.5. Conclusions

Les résultats montrent un effet dose qui n'est pas clair comparativement à ce qui est trouvé in vitro pour une raison que l'on s'explique mal. Néanmoins, le P soluble est diminué tel qu'attendu, et ce sans modifier les performances de croissance montrant que le P est insolubilisé après les sites d'absorption ou du moins que cette insolubilisation ne nuit pas à l'absorption. Dans un contexte où la limitation des rejets de P soluble représente un enjeu majeur pour la durabilité des écosystèmes aquatiques dans certaines régions à forte densité de production, l'ajout de sulfate de Fe ou d'alun encapsulé dans le régime du poulet pourrait permettre de réduire l'excrétion du P soluble. Toutefois, les effluents des élevages étant accumulés dans un milieu complexe qu'est la litière en conditions commerciales, un défi de taille demeure, soit l'insolubilisation et le maintien du P insoluble ou des complexes Fe/Al-P dans la litière.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.6. Remerciements

Les auteurs du document désirent remercier les partenaires financiers et techniques qui ont rendu possible la réalisation de cette étude : JEFO nutrition, le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), l'Université Laval, la Faculté des sciences de l'agriculture de l'alimentation (FSAA) et le département des sciences animales (SAN).

2.7. Références bibliographiques

Akter, M., Iji, P. A., et Graham, H. (2017). *Increased iron level in phytase-supplemented diets reduces performance and nutrient utilisation in broiler chickens*. British Poultry Science, 58(4), 409–417. https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1315050

Angel C. Roselina, Wendy J. Powers,* Todd J. Applegate, Nada M. Tamim, et M. C. C. (2005). *Influence of Phytase on Water-Soluble Phosphorus in Poultry and Swine Manure*. Journal of Environnemental. Quality, (34), 563–571.

Applegate, T. J., Joern, B. C., Nussbaum-Wagler, D. L., et Angel, R. (2003). *Water-soluble phosphorus in fresh broiler litter is dependent upon phosphorus concentration fed but not on fungal phytase supplementation*. Poultry Science, 82(6), 1024–1029. https://doi.org/10.1093/ps/82.6.1024

Bougouin, A., Appuhamy, J. A. D. R. N., Kebreab, E., Dijkstra, J., Kwakkel, R. P., et France, J. (2014*). Effects of phytase supplementation on phosphorus retention in broilers and layers*: A meta-analysis. Poultry science, 93(8), 1981-1992.

Cheng, T. K., Hamre, M. L., et Coon, C. N. (1997). *Effect of environmental temperature, dietary protein, and energy levels on broiler performance*. Journal of Applied Poultry Research, *6*(1), 1-17.

Correll, D. L. (1998). *The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review*. Journal of Environment Quality, 27(2), 261. https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x

Dao, T. H. (2003). *Polyvalent cation effects on myo-inositol hexakis dihydrogenphosphate enzymatic dephosphorylation in dairy wastewater*. Journal of Environmental Quality, 32(2), 694–701. https://doi.org/10.2134/jeq2003.6940

Dao, T., Sikora, L., et Hamasaki, A. (2001). *Manure phosphorus extractability as affected by aluminum-and iron by-products and aerobic composting*. Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/30/5/1693

Davis, P.N., Norris, L.C. et Kratzer, F.H. (1968) *Iron utilization and metabolism in the chick*. Journal of Nutrition, 94: 407-417.

Deobald, H. J., and Elvehjem, C. A. (1935). *The effect of feeding high amounts of soluble iron and aluminum salts*. American Journal of Physiology--Legacy Content, 111(1), 118-123.

Elliot, M. a, et Edwards, H. M. (1991). *Some effects of dietary aluminum and silicon on broiler chickens*. Poultry Science, 70(6), 1390–402. https://doi.org/10.3382/ps.0701390

Elwinger, K., Fisher, C., Jeroch, H., Sauveur, B., Tiller, H., et Whitehead, C. C. (2016). *A brief history of poultry nutrition over the last hundred years*. World's Poultry Science Journal, 72(December), 1–20. https://doi.org/10.1017/S004393391600074X

FASS, Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Research and Teaching, 3rd edition, January 2010. (www.fass.org/docs/agguide3rd/Ag_Guide_3rd_ed.pdf).

Huff, W. E., Moore, P. a., Balog, J. M., Bayyari, G. R., et Rath, N. C. (1996). *Evaluation of the Toxicity of Alum (Aluminum Sulfate) in Young Broiler Chickens. Poultry Science*, 75(11), 1359–1364. https://doi.org/10.3382/ps.0751359

Hurwitz, S., et Bar, a. (1971). *Calcium and phosphorus interrelationships in the intestine of the fowl.* J Nutr, 101(5), 677–685. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5577902

Józefiak, D., Engberg, R. G., et Ptak, A. (2016*). Relevance of gut microbiome and endogenous phosphatases on phytate breakdown in poultry–implications on phosphorus utilisation*. In Phytate Destruction-Consequences for Precision Animal Nutrition (pp. 33-44).

Lesson, S. et J.D. Summers, 2001. Nutrition of the Chicken. 4 ed., pp. 112-125.

Leytem, a B., Kwanyuen, P., et Thacker, P. (2008*). Nutrient excretion, phosphorus characterization, and phosphorus solubility in excreta from broiler chicks fed diets containing graded levels of wheat distillers grains with solubles.* Poultry Science, 87(12), 2505–2511. https://doi.org/10.3382/ps.2008-00052

Ma, W., Sun, H., Zhou, Y., Wu, J., et Feng, J. (2012). *Effects of iron glycine chelate on growth, tissue mineral concentrations, fecal mineral excretion, and liver antioxidant enzyme activities in broilers*. Biological Trace Element Research. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s12011-012-9418-5

Maenz, D. D., Engele-Schaan, C. M., Newkirk, R. W., et Classen, H. L. (1999). *The effect of minerals and mineral chelators on the formation of phytase-resistant and phytase-susceptible forms of phytic acid in solution and in a slurry of canola meal.* Animal Feed Science and Technology, 81(3–4), 177–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401 (99)00085-1

MCNAUGHTON, J.L. et DAY, E.J. (1979) *Effect of dietary Fe to Cu ratios on hematological and growth responses of broiler chickens.* Journal of Nutrition, 109: 559-564.

Metcalf, E. E., et Eddy, H. (2003*). Wastewater engineer treatment disposal, reuse*. New York: McGRaw.Third edition. 524 pg.

Moore, P., et Miller, D. (1994). *Decreasing phosphorus solubility in poultry litter with aluminum, calcium, and iron amendments.* Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/23/2/JEQ0230020325

National Research Council. 1994. *Nutritional requirements of poultry*. 8th rev. ed. National Academy Press, Washington, DC

Nelson, T. S. (1967). *The utilization of phytate phosphorus by poultry*—A review. *Poultry Science*, *46*(4), 862-871

Norris, D., Ngambi, J., et Mabelebele, M. (2014). *Genetic selection for docility*: A review. Jounal of Animal. Retrieved from http://www.thejaps.org.pk/docs/v-24-2/03..pdf

INRA-AFZ, 2002*. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'éleva*ge

Ondreicka, R., J. K. et E. G. (1971). *Aluminum, its absorption, distribution and effects in phosphorus metabolism*. In: S. C. Skoryna and D. Waldron-Edward (Ed.) Intestinal Absorption of Metal Irons, Trace Elements, and Radionuclides. Oxford, 200, p 293. Pergamon Press.

SAS Institute. 2004. SAS/STAT User's Guide. Release 9.1. SAS Inst. Inc., Cary, NC.

Schindler, D. W. (1977). *Evolution of phosphorus limitation in lakes. Science*, 195(4275), 260-262.

Selle, P. H., et Ravindran, V. (2007). Microbial phytase in poultry nutrition. Animal Feed Science and Technology, 135(1), 1-41.

Shafey, T. M., McDonald, M. W., et Dingle, J. G. (1991). *Effects of dietary calcium and available phosphorus concentration on digesta pH and on the availability of calcium, iron, magnesium and zinc from the intestinal contents of meat chickens.* British Poultry Science, 32(1), 185–194. https://doi.org/10.1080/00071669108417339

Sharpley, A. (1999). Symposium: *Reducing the environmental impact of poultry production: Focus on phosphorus: Agricultural phosphorus, water quality, and poultry production: Are they compatible*? Poultry Science, 78(5), 660–673. Retrieved from http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033126390etpartnerID=40etmd5=e341c303c4d35456d2ba9716bea41bbf

Shires, A., Thompson, J. R., Turner, B. V., Kennedy, P. M., and Goh, Y. K. (1987*). Rate of passage of corn-canola meal and corn-soybean meal diets through the gastrointestinal tract of broiler and White Leghorn chickens*. Poultry Science 66, 289-98.

Smith, D., et Moore, P. (2001). Effects of alum and aluminum chloride on phosphorus runoff from swine manure. Journal of …, 992–998. https://doi.org/10.2134/jeq2001.303992x

Toor, G. S., Peak, J. D., et Sims, J. T. (2005*). Phosphorus Speciation in Broiler Litter and Turkey Manure Produced from Modified Diets.* Journal of Environmental Quality, 697(July 2004), 687–697.

Tyler, C. (1946). *Studies in the absorption and excretion of certain minerals by poultry*. Journal Agricultural Science 36, 275-282.

Vadas, P. A., et Kleinman, P. J. A. (2006). *Effect of methodology in estimating and interpreting water-extractable phosphorus in animal manures*. Journal of Environmental Quality, 35(4), 1151–1159. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0332

Van der Klis, J. D., Verstegen, M. W. A., et De Wit, W. (1990). *Absorption of minerals and retention time of dry matter in the gastrointestinal tract of broilers*. Poultry Science, 69(12), 2185-2194.

Weiss, W. P., et Faulkner, M. J. (2015). *Practical Recommendations for Trace Minerals for Lactating Dairy Cow*s, 47–63.

Zimmermann, M. B., et Windhab, E. J. (2010). *Encapsulation of iron and other micronutrients for food fortification*. In Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing (pp. 187-209). Springer New York.

CHAPITRE III

Impact de de sulfate de fer micro-encapsulé sur les performances de croissance, la minéralisation osseuse et la digestibilité et l'excrétion de phosphore soluble dans l'eau chez le poulet en croissance

Floradin P., Guay F.*, Létourneau-Montminy M.P.*†*

*Département des sciences animales, Université Laval, Québec City, QC G1V-0A6, Canada.
piterson.floradin.1@ulaval.ca

Résumé

Une expérience a été réalisée afin d'évaluer la nécessité ou non d'encapsuler le fer (Fe) dans l'alimentation des poulets afin de réduire la solubilité du phosphore (P) dans les litières de poulet de chair. En plus du P soluble, la digestibilité jéjunale et iléale des minéraux (Ca, Fe et P) et l'accumulation de Fe dans les reins et le foie, la minéralisation osseuse ont été étudiées. Les poulets ont été nourris selon un programme alimentaire en 3 phases (0-10, 10-21, 21-34 jours) de façon à satisfaire l'ensemble de leurs besoins nutritionnels à l'exception du Fe. Les régimes expérimentaux pour chaque phase étaient :1) un traitement témoin (C+); 2) les aliments 2 et 3 étaient ce même C+ additionné de 33 et 60 ppm de fer sous forme de sulfate de Fe encapsulé; 3) et les aliments 4 et 5 étaient identiques au 2 et 3 mais le fer était sous forme de sulfate de Fe non encapsulé. Chaque régime alimentaire a été attribué à 12 parquets de 45 poulets de souche Cobb 500 âgés d'un jour. Les digesta, les reins, le foie et le tibia ont été collectés sur 6 oiseaux par parquet aux jours 30 et 31. La litière a été collectée en fin de lot au jour 35. Les résultats montrent que l'ajout de Fe a réduit le GMQ (P = 0,05), le PV final (P = 0,01) et le contenu minéral osseux du tibia (CMO; P = 0,02). Le PV final était davantage réduit lorsque le Fe était non encapsulé (P = 0,01). Le poids vif final (P < 0,001), la CMJ (P = 0,01), le GMQ (P = 0,03), la digestibilité jéjunale (P=0,06) et iléale (P=0,04) du P phytique étaient réduits par la dose élevée de fer encapsulé. Une augmentation de la digestibilité iléale de P total (P < 0,001), P phytique (P = 0,01), Ca (P < 0,001) et Fe (P < 0,001) était observée avec l'ajout de Fe. Cet effet était plus marqué pour le Fe non encapsulé pour P total (P < 0,001) et P phytique (P = 0,01) et non différent pour la digestibilité du Ca et du Fe. Les animaux ayant reçu la dose élevée de Fe encapsulé présentaient une teneur plus élevée de Fe dans le foie (0,60 vs. 0,51 ; P = 0,04) comparés à ceux consommant la faible dose. La proportion de P soluble et la quantité n'étaient pas affectées par les traitements alimentaires au niveau du jéjunum et de l'iléon. Dans la litière, l'ajout de Fe augmentait la proportion de P soluble (P < 0,001). En conclusion, l'ajout de sulfate de Fe encapsulé ou non dans le régime des poulets réduit les performances de croissance et ne permet pas d'insolubiliser le P des litières.

Mots clés : Phosphore soluble ; encapsulation ; sulfate de fer; poulet; digestibilité jéjunale; digestibilité iléale

Abstract

An experiment was conducted to evaluate whether it is necessary to encapsulate iron (Fe) in broilers feed to reduce water-soluble phosphorus (WSP) in broiler litter. In addition to WSP, the apparent jejunal and ileal digestibility of minerals (calcium, Fe and P) and Fe accumulation in kidneys and liver and bone mineralization were studied. The experiment was divided in three-phases feeding program (0-10, 10-21, 21-34 days) to meet all nutritional requirements except Fe. Diets tested for each phase were: 1) a positive control (C +); 2) feeds 2 and 3 were the same C + supplemented with 33 and 60 ppm Fe as Fe sulfate encapsulated 3) and feeds 4 and 5 were the same as the treatment diets 2 and 3 but the Fe was in the form of unencapsulated. Forty-five males Cobb 500 broilers of 1 d-old, were assigned to 1 of 5 diets with 12 pens per diet. Six birds per pen were euthanized by cervical dislocation at d 30 and 31. The litter was collected at the end of the batch at day 35. Iron supplemented diet reduced the ADG (P = 0,05), BW (P = 0,01) and BMC (P = 0,02). BW gain (P <0,001), ADFI (P = 0,01), ADG (P = 0,03), apparent jejunal and ileal digestibility (P = 0,06) (P = 0,04) of P phytic were reduced by the high dose of Fe encapsulated. A significant increase in apparent ileal digestibility of P total (P <0,001), P phytic (P = 0,01), Ca (P <0,001) and Fe (P <0,001) was observed with the addition of Fe. These effects were stronger with unencapsulated Fe for total P (P <0,001) and P phytic (P = 0,01) and not different for digestibility of Ca and Fe. Fe supplemented diets increased the concentration of Fe in the liver (0,60 vs. 0,51, P = 0,04). Iron did not significantly affect WSP concentration in the jejunum, ileum and caecum, but increase WSP in the litter (P <0,001). In conclusion, the addition of Fe sulfate encapsulated or not in the diet of chickens reduces growth performance and does not insolubilize the P in the litter.

Keys Words: Water Soluble-Phosphorus; Iron sulfate; Broiler; Apparent jejunal digestibility; Apparent ileal digestibility;

3.1. Introduction

Pour une gestion durable des ressources aquatiques, des règles strictes de gestion de la charge phosphore (P) sont en vigueur au Québec (REA, 2002; MDDELCC, 2016). En effet, l'excès en P provenant des sols amendés avec les effluents d'élevage peut entraîner dans les zones à forte concentration d'élevage l'eutrophisation des eaux de surface se caractérisant par des problèmes de prolifération des cyanobactéries réduisant, par le fait même, la qualité des eaux et la biodiversité aquatique (Correll, 1998).

L'ajout de la phytase microbienne dans les aliments représente une voie clé d'amélioration de l'utilisation de P phytique et de diminution de l'excrétion de P (Waldroup, 1999; Dilger, 2004; Selle et Ravindran, 2007). Cette enzyme permet de libérer les groupements phosphates liés au P sous forme phytique dans les aliments, qui sinon, ne peuvent être absorbés et sont excrétés dans les fèces. Cependant, malgré les efforts déployés pour réduire les rejets, plus de 45 à 50 % du P ingéré est toujours excrété par les poulets (Bougouin et al., 2014). De plus, certaines études montrent une augmentation de la proportion de P soluble dans les effluents avec l'ajout de phytase, forme engendrant la prolifération des algues bleues-vertes responsable du phénomène d'eutrophisation (DeLaune et Moore, 2004; Miles et al., 2003; Vadas et al., 2004). Ceci est d'autant plus important considérant l'utilisation croissante des ingrédients alternatifs riches en P (ex. phosphate, phytase, drêches) sans nécessairement abaisser le niveau de P alimentaire lors de la formulation (Applegate et al., 2003).

Le P peut former des complexes avec d'autres nutriments et devenir insoluble (Maenz et al., 1999). C'est le cas de certains cations divalents tels le Ca, le Fe et l'Al (Ondreicka et al.,1971; Maenz et al., 1999). Un essai précédent de preuve de concept (Chapitre 2) a montré qu'il était possible d'insolubiliser jusqu'à 24% du P excrété dans les fientes de poulet par l'ajout de sulfates d'Al et de Fe dans l'alimentation des poulets. Étant donné que seul le P soluble dans le tube digestif peut être absorbé par les volailles, il était essentiel que l'insolubilisation du P soit effectuée en aval des sites d'absorption pour ne pas modifier les performances. Le Fe et l'Al avaient donc été micro-encapsulés pour éviter une insolubilisation avant ou au niveau des sites d'absorption. Cependant, l'impact de ces ingrédients sur la disponibilité du P n'a pas été élucidé dans cet essai. Certaines études montrent une réduction de la minéralisation osseuse pour des concentrations élevées de Fe non encapsulé ajoutées dans l'aliment des poulets (Tsay et al., 2010; Jia et al., 2012; Akter et al, 2017).

En rapport avec ces faits, nous avons émis l'hypothèse que 1) la libération du Fe tardivement, par la micro-encapsulation, dans la partie distale de l'intestin permettrait d'insolubiliser le P des litières sans modifier la digestibilité des nutriments, la minéralisation osseuse et les performances des poulets, 2) le Fe sous forme encapsulé n'induirait pas des accumulations problématiques dans les tissus corporels. Par conséquent, un second essai a été réalisé pour évaluer la nécessité ou non de la micro-encapsulation du supplément de Fe,

Rapport-Gratuit.com

sur la digestibilité, la minéralisation osseuse et l'accumulation dans les tissus et la possibilité d'insolubiliser le P dans les litières à la fin de l'élevage.

3.2. Matériels et méthodes

3.2.1. Aliments expérimentaux

L'expérience a été divisée en 3 phases d'alimentation (0-10 jours, 10-21 jours et 22-35 jours). Pour chaque phase, les traitements expérimentaux étaient un traitement témoin positif (C+) correspondant à ce qui est couramment utilisé en conditions commerciale pour satisfaire l'ensemble des besoins nutritionnels des animaux (Tableau 3.1), les aliments 2 et 3 étaient ce même C+ additionnés de 33 et 60 ppm de Fe sous forme de sulfate de Fe encapsulé (33 % FeSO4.7H20 et 67 % gras) et les aliments 4 et 5 était toujours le C+ additionné de 33 et 60 ppm de Fe mais sous forme de sulfate de Fe non encapsulé (Tableau 3.2). De la célite (terre de diatomées) a été ajoutée aux aliments de la phase 3 comme marqueur indigestible à un taux d'incorporation de 2% pour les mesures de digestibilité iléale et jéjunale.

Tableau 3.1. Descriptions des aliments expérimentaux

Traitements	Description des traitements	Fe ajouté ($mgkg^{-1}$)
C+[1]	Témoin + Billes vides[2]	0
FeEnc1	Témoin + Sulfate de Fer encapsulé[3]	33
FeEnc2	Témoin + Sulfate de Fer encapsulé	60
FeNEnc1	Témoin + Sulfate de Fer non encapsulé	33
FeNEnc2	Témoin + Sulfate de Fer non encapsulé	60

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les recommandations nutritionnelles de Leeson et Summers (2005) pour satisfaire l'ensemble des besoins nutritionnels des animaux. [2]Les billes vides étaient constituées de 100% de gras saturés. [3]Les billes de sulfate de fer micro encapsulé étaient constituées de 33 % de sels métalliques et de 67 % de gras saturés. Chaque molécule de sulfate de fer apportait 36% de Fe ($FeSO_4$ anhydride).

3.2.2. Animaux et conduite d'élevage

L'expérience a été conduite selon les recommandations du Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Research and Teaching (FASS, 2010). Les 2700 poulets de chair mâles ont été pesés dès leur arrivée. Un plan en bloc complet (12) randomisé avec 5 traitements pour un total de 60 parquets et contenant 45 oiseaux par paquet a été utilisé pour cet essai. La densité animale allouée était de 0.08 m²/poulet, soit 12,5 poulets/m². Les poulets ont été pesés aux jours 0, 10, 21 et 34. La quantité d'aliments consommés par parquet a été mesurée par phase de croissance (0-10, 10-21, 21-34 jours) et divisée par le nombre de jours de la phase pour obtenir la consommation moyenne journalière (CMJ). La température ambiante initiale pour les poussins

a été fixée à environ 32 °C et réduite de 2 à 3 °C par semaine jusqu'à atteindre 22 °C, température qui a été maintenue pendant les 2 dernières semaines d'élevage. Le programme lumineux était de 24h de jour pour la première semaine et réduit progressivement jusqu'à 16 h par jour à la fin de la dernière la semaine.

Tableau 3.2. Composition de base des aliments expérimentaux par phase

Ingrédients, %	**Phases alimentaires**		
	Démarrage 0 au jour 10	Croissance au jour	Finition au jour
Maïs	56,7	59,6	55,9
Tourteau de soja, 48 %	35,9	31,8	30,8
Gras végétal	2,40	4,2	7,3
Pierre à chaux	1,30	1,2	1,2
Phosphate monocalcique[2]	1,53	1,32	1,1
SQ-810 (Bicarbonate)	0,26	0,28	0,24
Micro-premix	0,2	0,2	0,2
Biolysine 70	0,41	0,35	0,18
Méthionine	0,375	0,325	0,25
Prémix vitamine[3]	0,15	0,15	0,05
Threonine	0,12	0,094	0,055
Chlorure de choline	0,076	0,070	0,07
Premix phytase[4]	0,05	0,05	0,05
BMD-110 (Bacitracyne)	0,05	0,050	0,05
Deccox	0,05	0,050	
Sacox 12%			0.05
Sel	0,025	0,249	0,24
Célite			2,00
Composition chimique analysée[1]			
Matière sèche	91,8	89,5	88,66
Protéines brutes	25,2	23,9	23,18
Calcium	1,06	0,99	0,99
Phopshore Total	0,82	0,70	0,67
P phytique[4]	0,25	0,24	0,23
P disponible[5]	0,55	0,48	0,43
Ca/ P disponible			
Fer, mg/kg	299	353	335

[1]Exprimée sur base de matière humide.[2] Phosphate monocalcique : 18 % de Ca, 21 % P et 0,16 % fluor (F). [3]Apport par kg d'aliment : Vitamine A, 10 499,89 UI; Vitamine D, 4 999,9500 UI; Vitamine E, 99,9998 UI ; Choline, 401,88 mg; Fer, 39,99 mg; 41; Zinc, 100,0025 mg; Cuivre 14,99 mg; Iode, 14,2480 mg; Sélénium, 0,2997 mg. [4]Phytase Quantum blue : L'activité phytasique n'a pas été mesurée et a été évaluée théoriquement dans toutes les phases à 1500 UI/kg pour fournir 2g/kg de P disponible dans les régimes. [4]P Phytique : valeurs attendues .[5]P disponible : calculé selon les tables INRA-AFZ, 2002). Toutes les analyses ont été effectuées en duplicata et les niveaux de variations entre les duplicatas étaient inférieurs à 5 %

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.2.3. Collecte des échantillons

Dans la matinée des jours 30 et 31, les lumières ont été allumées 3 heures avant le début de la collecte, de façon à avoir un maximum de contenu dans les segments désirés. Six oiseaux ont été choisis au hasard dans chacun des parquets, pesés puis euthanasiés par dislocation cervicale. Les différentes portions du tube digestif, soit le jéjunum distal (partie inférieure du jéjunum divisé en 2), l'iléon distal (du diverticule de Meckel à la jonction iléo-cæcale), ont été immédiatement isolées, sectionnées et leur contenu a été prélevé à l'aide d'un «flushing» à l'eau déminéralisée selon les protocoles décrits par Rodehutscord (2013) et Mutucumarana, et al (2015). Au même moment, les caeca ainsi que leur contenu, le tibia droit, le rein droit et le foie ont été collectés et combinés par parquet. Les échantillons de digesta, les reins, le foie et les caeca ont été ensuite congelés à -20 °C, lyophilisés, broyés à travers un tamis de taille 0,5 mm.

Au début de l'élevage, la quantité de ripes ajoutée dans chaque parquet a été pesée et échantillonnée pour analyse de la teneur en humidité initiale. En fin de lot (jour 35), la quantité totale de litière par parquet été pesée et des échantillons de litière ont été collectés selon la méthode d'échantillonnage en W (Figure 3.1; CPVQ, 1996). Cette méthode consistait à prendre plusieurs sous-échantillons (9 au total) à l'aide d'un planteur à bulbe, sur chacun des bras du W. Les neuf (9) échantillons ainsi obtenus ont été mélangés pour constituer un échantillon homogène et représentatif de l'ensemble de la litière d'un parquet. Les teneurs en humidité et en matière sèche de ces échantillons de litière ont été déterminées en séchant les échantillons à 70 °C pendant 72 heures. Les échantillons de litières ont été ensuite broyés et stockés à température ambiante.

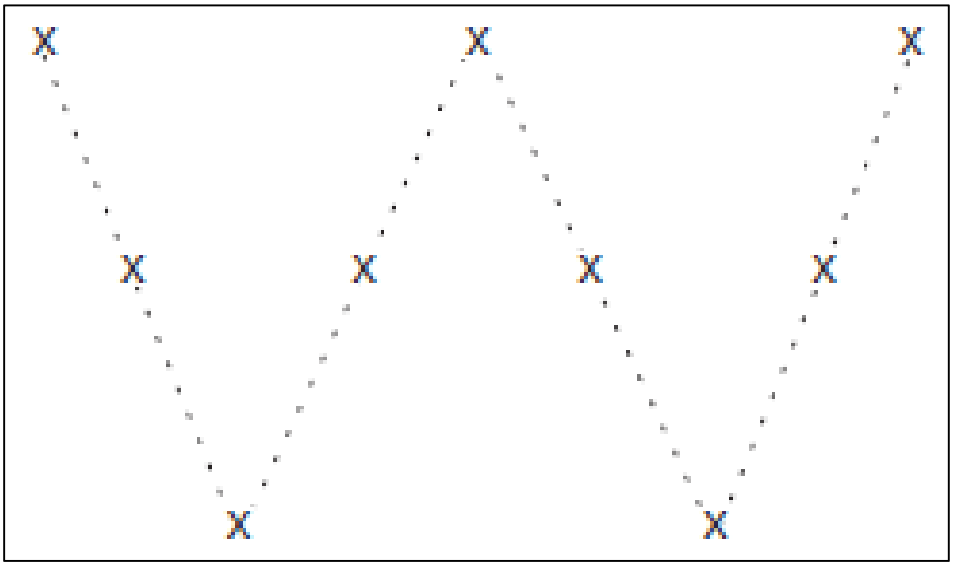


Figure 3.1. Représentation schématique des 9 points de collecte de la méthode d'échantillonnage en W (CPVQ; 1996)

3.2.4. Analyses

Après la détermination de la teneur en matière sèche (étuve à 100°C pendant 16 heures ; AOAC International, 2005; method no: 930.15) des échantillons (aliment, digesta, litière), ils ont été réduits en cendre à 600°C pendant 48 h dans un four à moufle. Après réduction en cendres et dissolution dans l'acide chlorhydrique (HCl, 3M) et l'acide nitrique (HNO_3), la concentration en P total des échantillons a été déterminée selon la méthode colorimétrique métavanadate en utilisant un spectrophotomètre (GENESYS 10S UV-Vis, Thermo scientifique, US). Le Ca et le Fe ont été dosés par spectrométrie d'émission optique à plasma couplé par induction (ICP-OES). La proportion de P soluble dans la litière et les digesta a été déterminée en agitant 1 g d'excréta sec dans 250 ml d'eau déminéralisée pendant deux heures et en filtrant à travers une membrane de 0.45 µm, puis en utilisant réactif molybate-métavanadate pour précipiter et doser le P disponible dans la solution tel que décrit par Vadas et Kleinman (2006). Suite à une extraction à l'acide (HCl ; 0.66M) et une neutralisation avec le NaOH (0,75M) des échantillons d'aliments et de digesta, la teneur en P phytique a été déterminée comme la quantité de P libérés après une déphosphorylation enzymatique par la phytase et la phosphatase alcaline en utilisant le kit Megazyme (K-PHYT, Megazyme International Ireland, Bray, Ireland) comme indiqué dans McKie et McCleary (2016). La teneur en célite des aliments et des digesta a été déterminée par la méthode des cendres insolubles, en faisant dissoudre 0.5 g d'échantillon dans 50 ml HCl (4N) pendant 15 minutes et filtrés à travers une membrane sans cendres. La membrane a été par la suite lavée avec de l'eau bouillante jusqu'à ce qu'il y ait plus d'acide et incinérée à 650 °C pendant 12 heures (McCarthy et al., 1974).

Les tibias droits ont été cuits à l'autoclave sous un cycle à 122 ^{0}C pendant 45 minutes pour faciliter l'élimination des tissus mous adhérents à l'os et les cartilages (Hall et al., 2003). La densité minérale osseuse (DMO; exprimée en g / cm^2) et le contenu minéral osseux (CMO, exprimé en g) de chaque tibia ont été mesurés à l'aide d'un densitomètre à double rayons-X (DXA; Discovery W; Hologic Inc., Waltham, MA, USA) en mode petit animal. Chaque tibia a été scanné dans la direction craniocaudale (Zotti et al., 2003).

3.2.5. Calculs et analyses statistiques

Le GMQ et la CMJ ont été calculés pendant toute la période expérimentale. Le GMQ a été obtenu en mesurant la différence entre les mesures finales et initiales et en divisant par le nombre de jours de chaque phase d'alimentation. L'indice de conversion alimentaire (IC) a été estimé pour chaque parquet comme le rapport entre CMJ et GMQ. Le bilan P, Ca et Fe a été déterminée en tenant compte des différences entre le P total et le Ca dans les excréta (Qté de litière - Qté de ripe) et les ingérés (Applegate et al., 2003). Les coefficients de digestibilité des nutriments jéjunaux et iléaux apparents ont été calculés à l'aide de la méthode du marqueur indigestible (Rodehutscord, 2013) basée sur l'équation suivante :

Digestibilité $P\ ou\ Ca$ (%) = 100 − 100 x (célite$_{aliment}$ $x\ P\ ou\ Ca_{digesta}$) / (célite$_{digesta}$ $x\ P\ ou\ Ca_{aliment}$)

L'unité expérimentale était le parquet pour toutes les variables dépendantes mesurées sauf pour la minéralisation osseuse où les mesures ont été effectuées sur chaque poulet. Les résultats de l'expérience ont été soumis à une analyse de variance selon la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS, 2009 version 9.4). Le dispositif expérimental était constitué de 12 blocs complets. Le parquet était l'unité expérimentale. Les effets des différents traitements (ingrédients actifs, encapsulation et doses) sur les variables dépendantes mesurées dans l'essai ont été comparés entre eux et avec le traitement témoin par des contrastes : 1) effet du Fe ajouté : C+ vs les autres traitements, 2) effet de l'encapsulation FeEnc vs FeNEnc et 3) effet dose (FeEnc1 vs. FeEnc2; FeNEnc1 vs. FeNEnc2). Les différences ont été considérées significatives lorsque P <0,05, et les tendances ont été notées lorsque P <0,10.

3.3. Résultats

Les teneurs en Ca et P des traitements alimentaires analysés étaient conformes aux valeurs attendues lors de la fabrication des aliments. Les niveaux de Fe de l'aliment C+ étaient plus de deux fois plus élevée que celle attendue (Tableau 3.3). La différence obtenue par rapport à C+ et les autres traitements était conforme à ce qui était attendue pour le Fe encapsulé et supérieures lorsqu'ils se trouvaient sous forme non encapsulée (+ 20 ppm).

Tableau 3.3. Teneur en calcium, en phosphore total et en fer des aliments expérimentaux.

Traitements	Ca total	P total	Fe
	g/kg	g/kg	mg/kg
Début (0-10)			
C+	1,19	0,85	299
FeEnc1	1,05	0,84	332
FeENc2	1,10	0,84	370
FeNEnc1	1,03	0,80	301
FeNEnc2	0,95	0,79	391
Croissance (10-22)			
C+	0,89	0,68	253
FeEnc1	1,07	0,72	289
FeENc2	0,99	0,77	315
FeNEnc1	1,01	0,69	354
FeNEnc2	1,02	0,69	323
Finition (22-34)			
C+	1,15	0,71	335
FeEnc1	0,98	0,65	357
FeENc2	1,02	0,68	373
FeNEnc1	0,90	0,66	383
FeNEnc2	0,93	0,69	419

Les résultats sont exprimés en matière sèche. Toutes les analyses ont été effectuées en duplicata et les niveaux de variations entre les duplicatas étaient inférieurs à 5 %.

3.3.1. Performances de croissance

Le poids vif initial (PV initial) des oiseaux était identique au début de l'expérience (42,6±0,18; Tableau 3.4). Au cours de la première phase d'alimentation, les résultats montraient que l'ajout de Fe dans le régime a significativement amélioré le poids vif final (PV final), le gain moyen quotidien (GMQ) et la consommation journalière (CMJ) des oiseaux sans modification de l'indice de conversion (IC) et de la mortalité. Il n'y avait pas d'effet de l'encapsulation ou du niveau de Fe ajouté. Dans la seconde phase, le poids vif final et la CMJ était réduit chez les poulets recevant les régimes contenant du Fe (respectivement, P = 0,003 et P= 0,048). Cette réduction du poids s'expliquait en partie par la baisse du GMQ pour la dose élevée de Fe encapsulé (FeEnc1 vs. FeENc2; P=0,011). L'IC et la mortalité n'étaient pas modifiés par les traitements alimentaires.

En période de finition, l'ajout de Fe réduisait le GMQ (P = 0,007; Tableau 3.4), mais pas le poids vif final (P = 0,371). Cependant, une baisse de poids était observée pour la dose 2 de Fe encapsulé (2486 g vs 2388 g; P = 0,011). L'augmentation de la dose de Fe encapsulé réduisait également l'IC (P = 0,002). La mortalité et la CMJ n'étaient pas modifiées.

Pour toute la durée de l'expérience, l'ajout de Fe réduisait le GMQ (P = 0,0571). La CMJ (P = 0,026) et le GMQ (P = 0,007) étaient réduits par la dose 2 de Fe encapsulé donnant des valeurs numériquement similaires aux doses non encapsulés. La mortalité et l'IC n'étaient pas modifiés par les différents traitements.

3.3.2. Digestibilité et excrétion

Au niveau jéjunal et iléal, l'ajout de Fe augmentait le coefficient de digestibilité de P (P < 0,01; Tableau 3.5) et de P phytique (P < 0,001). Cet effet était d'autant plus marqué que le Fe était non encapsulé (FeEnc vs FeNEnc) pour le P total (P < 0,001) et le P phytique (P < 0,01). Une augmentation de la digestibilité de P total (P < 0,001) était observée avec la dose plus élevée de Fe encapsulé. L'augmentation de la dose de Fe encapsulé réduisait la digestibilité jéjunal (70 vs 60 %, P=0,06) et iléal (65 vs 55 %, P=0.06) du P phytique. L'ajout de Fe augmentait également le coefficient de digestibilité iléal de Ca (P < 0,001) et le coefficient de digestibilité jéjunale (P < 0,001) et iléale (P < 0,001) du Fe. Le coefficient de digestibilité jéjunal et iléal de Ca était également améliorée pour la dose 2 de Fe encapsulé (respectivement, P = 0,002 et P= 0,001), mais non différent pour le Fe non encapsulé. L'ajout de Fe réduisait l'excrétion de P (P < 0,001) et de Ca (P = 0,006), mais ne modifiait pas celle de Fe (Tableau 3.6).

Tableau 3.4. Performances de croissance des poulets par phase en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment

Performances pour claque phase										
	Traitements alimentaires						Probabilités			
Paramètres	C+[1]	FeEnc1	FeENc2	FeNEnc1	FeNEnc2	ETR[2]	C+ vs., autres	FeEnc vs., FeNEnc	FeEnc1 vs., FeENc2	FeNEnc1 vs., FeNEnc2
Phase 1 (0-10 jours)										
Poids vif initial, g	42,7	42,5	42,7	42,2	42,8	0,18	0,684	0,666	0,564	0,28
Poids vif final, g	227	242	238	237	236	3,21	0,003	0,327	0,399	0,743
Gain moyen quotidien, g/j	18,3	19,8	19,4	19,5	19,2	0,32	0,001	0,401	0,426	0,646
Consommation moyenne journalière, g/j	24,2	25,3	25,5	25,4	25,0	0,36	0,012	0,651	0,657	0,397
Indice de conversion	1,33	1,28	1,31	1,31	1,30	0,020	0,195	0,607	0,195	0,712
Mortalité, %	1,48	1,11	0,61	0,74	0,75	0,44	0,172	0,799	0,429	0,989
Phase 2 (10-22 jours)										
Poids vif final, g	1017,9	1027,2	996,1	1010,9	1004,3	8,115	0,003	0,327	0,399	0,743
Gain moyen quotidien, g/j	65,8	65,6	63,2	64,5	64,1	0,654	0,371	0,622	0,011	0,565
Consommation moyenne journalière, g/j	87,8	86,5	84,6	87,0	86,1	0,933	0,048	0,873	0,015	0,687
Indice de conversion	1,33	1,32	1,34	1,35	1,34	0,014	0,111	0,273	0,163	0,497
Mortalité, %	0,38	0,57	0,82	0,93	0,93	0,310	0,766	0,185	0,321	0,730
Phase 3 (22-34)										
Poids vif final, g	2477	2486	2388	2359	2402	21,54	0,371	0,622	0,011	0,565
Gain moyen quotidien, g/j	104	103	98	96	99	2,323	0,007	0,012	0,003	0,162
Consommation moyenne journalière, g/j	181	185	176	176	178	1,762	0,061	0,162	0,160	0,285
Indice de conversion	1,75	1,80	1,81	1,85	1,81	0,020	0,180	0,084	0,002	0,434
Mortalité, %	0,33	0,66	0,36	0,00	0,49	0,248	0,168	0,603	0,887	0,491
Overall (0-34 jours)										
Gain moyen quotidien, g/j	65	65	62	62	63	1	0,051	0,113	0,026	0,413
Consommation moyenne journalière, g/j	101	101	98	99	99	1	0,135	0,358	0,007	0,977
Indice de conversion	1,56	1,57	1,58	1,61	1,58	0,02	0,293	0,370	0,630	0,448
Mortalité, %	2,19	2,34	1,79	1,67	2,17	0,56	0,757	0,800	0,501	0,531

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (Leeson et Summer, 2005). [2] Écart type résiduel

Tableau 3.5. Digestibilité apparente jéjunale et iléale du P total, du P phytique, du calcium et du fer en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment

Paramètres	Traitements alimentaires					ETR[2]	Probabilités			
	C+[1]	FeEnc1	FeENc2	FeNEnc1	FeNEnc2		C+ vs., autres	FeEnc vs., FeNEnc	FeEnc1 vs., FeENc2	FeNEnc1 vs., FeNEnc2
Phosphore total										
P jéjunum, %	0,86	0,83	0,77	0,74	0,76	0,03	0,037	0,126	0,245	0,779
Digestibilité apparente jéjunum, %	61,46	60,61	67,23	71,16	70,94	1,62	0,002	<0,001	0,007	0,922
P iléon, %	1,19	1,18	1,14	1,05	1,11	0,04	0,116	0,065	0,454	0,301
Digestibilité apparente iléon, %	64,77	64,60	69,75	72,21	73,45	1,09	<0,001	<0,0001	0,002	0,422
Phosphore phytique										
P jéjunum, %	0,38	0,25	0,25	0,24	0,21	0,02	<0,001	0,267	0,875	0,380
Digestibilité apparente jéjunum, %	40,69	69,99	60,01	75,58	78,06	3,60	<0,001	0,002	0,057	0,622
P iléon, %	0,43	0,46	0,46	0,39	0,45	0,04	0,804	0,257	0,957	0,283
Digestibilité apparente iléon, %	56,17	64,58	55,11	72,60	70,30	3,25	0,012	0,001	0,044	0,619
Calcium										
Ca jéjunum, %	1,61	1,65	1,48	1,48	1,47	0,07	0,274	0,213	0,108	0,899
Digestibilité apparente jéjunum, %	55,29	48,14	58,55	58,13	58,07	2,16	0,859	0,034	0,002	0,983
Ca iléon, %	2,33	2,05	1,89	1,95	1,88	0,07	<0,001	0,433	0,139	0,499
Digestibilité apparente iléon, %	57,55	59,41	66,47	61,79	66,60	1,43	0,001	0,391	0,001	0,022
Fer										
Fe jéjunum, %	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,004	0,110	0,122	0,747	0,506
Digestibilité apparente jéjunum, %	21,96	28,99	36,37	39,96	40,18	2,86	<0,001	0,014	0,080	0,958
Fe iléon, %	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,01	0,212	0,117	0,374	0,219
Digestibilité apparente iléon, %	32,17	42,51	46,82	47,59	50,74	3,10	<.0001	0,140	0,320	0,456

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (Leeson et Summer, 2005). [2] Écart type résiduel

3.3.3. Teneurs dans les tissus

La teneur en Fe dans les reins était indépendante des traitements alimentaires. Les animaux ayant reçu les régimes supplémentés avec le FeENc2 présentaient une teneur plus élevée de Fe dans le foie (0,60 vs. 0,51; P = 0,04; Tableau 3.7) comparativement aux animaux nourris avec les régimes FeEnc1. L'ajout de Fe réduisait le contenu minéral osseux (CMO) (P=0,020), alors qu'une une tendance pour une augmentation était observée pour la densité minérale osseuse (DMO) (P=0,084). Une diminution du CMO (FeEnc1 vs FeEnc2; P = 0,009) était observée avec la dose plus élevée de Fe encapsulé.

3.3.4. Phosphore total et soluble dans le jéjunum, l'iléon, le cæcum et dans la litière

La proportion de P soluble et la quantité n'étaient pas affectées par les traitements alimentaires au niveau du jéjunum, et de l'iléon. Dans les caeca, la proportion tendait (P = 0,06; Tableau 3.8) à être plus élevée dans les régimes contenant du Fe indépendamment de la forme et de la dose. La concentration de P total exprimée en g/kg de MS dans la litière était indépendante la forme et de la dose de Fe ajouté. En revanche, l'ajout de Fe réduisait l'excrétion du P insoluble (P=0.02) et augmentait la proportion de P soluble (P < 0,001).

3.4. Discussion

Dans un essai précédent (Chapitre 2) nous avons montré qu'il était possible d'insolubiliser le P dans les fientes en ajoutant du Fe encapsulé dans les aliments, et ce, sans effet sur les performances de croissance et la rétention du P. Ceci basé sur la formation de complexes Fe et PO_4^{3-} tel que bien documenté et utilisé pour le traitement des eaux usées (Metcalf et Edy, 2003). En se complexant, les deux minéraux deviennent sous une forme insoluble non disponible pour l'animal qui va entraîner une réduction des performances de croissance et de l'efficacité d'utilisation du P des poulets (Cao et al., 1996; Akter et al., 2017). Pour éviter cet effet, le supplément de Fe avaient été micro-encapsulé pour se libérer dans l'intestin grêle distal. Par contre dans le présent essai, le niveau basal de Fe était 2 à 3 fois plus élevé que celui attendu. Ceci pourrait provenir d'un niveau plus élevé de Fe que prévu dans les ingrédients utilisés (ex. phosphate monocalcique) utilisé et confirmer par augmentation du Fe dans le foie suggérant un effet réel du supplément sur le statut en Fe.

Les résultats du présent essai montrent une diminution du GMQ et du poids final dans toutes les phases sauf la phase 1 où l'ajout de Fe a légèrement amélioré le GMQ et le poids vif final. L'effet positif en phase 1 peut être attribué aux besoins plus élevés de Fe chez le jeune poulet pour maximiser sa croissance, le développement de ces organes et pour maintenir son statut en Fe. Cette demande accrue en Fe rend les jeunes poulets moins sensibles à des concentrations élevées de Fe dans l'aliment comparé aux adultes (Cao et al., 1996). Dans les autres phases, l'ajout de Fe réduisait la CMJ et le GMQ (-3%), et ce, davantage quand

Tableau 3.6. Résultats des bilans de rétention de calcium, de phosphore et fer en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment

Paramètres	Traitements alimentaires						Probabilités			
	C+[1]	FeEnc1	FeENc2	FeNEnc1	FeNEnc2	ETR[2]	C+ vs., autres	FeEnc vs., FeNEnc	FeEnc1 vs., FeENc2	FeNEnc1 vs., FeNEnc2
Phosphore										
P ingéré, g/j/oiseau	0,715	0,696	0,708	0,673	0,690	0,006	<0,001	0,001	0,141	0,041
P excrété, g/j/oiseau	0,309	0,290	0,275	0,279	0,285	0,011	0,032	0,967	0,364	0,727
Calcium										
Ca ingéré, g/j/oiseau	0,806	0,820	0,793	0,791	0,804	0,006	0,566	0,157	0,005	0,163
Ca excrété, g/j/oiseau	0,483	0,431	0,399	0,398	0,431	0,021	0,006	0,978	0,303	0,272
Fer										
Fe ingéré, g/j/oiseau	0,026	0,031	0,034	0,026	0,027	<0,001	<0,001	<,0001	<,0001	0,004
Fe excrété, g/j/oiseau	0,023	0,023	0,022	0,024	0,024	0,001	0,972	0,314	0,769	0,956

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (Leeson et Summer, 2005); [2] Écart type résiduel

Tableau 3.7. Caractéristiques osseuses des poulets et concentration rénales et hépatiques fer en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment

Paramètres	Traitements alimentaires					ETR[2]	Probablités			
	C+[1]	FeEnc1	FeENc2	FeNEnc1	FeNEnc2		C+ vs., autres	FeEnc vs., FeNEnc	FeEnc1 vs., FeENc2	FeNEnc1 vs., FeNEnc2
Fer reins, mg/g MS	0,26	0,27	0,26	0,26	0,27	0,01	0,563	0,994	0,558	0,671
Fer foie, mg/ g MS	0,50	0,51	0,60	0,54	0,60	0,03	0,091	0,748	0,037	0,155
Contenu minéral osseux, g	2,55	2,53	2,38	2,42	2,45	0,042	0,0202	0,638	0,009	0,604
Densité minérale osseuse, g/cm2	0,275	0,286	0,281	0,282	0,275	0,003	0,0840	0,108	0,1811	0,038

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (Leeson et Summer, 2005). [2] Écart type résiduel

apport-Gratuit.com

il était non encapsulé (-4%) indépendamment de la dose. Un effet dose était cependant observé pour le Fe encapsulé, lequel pourrait provenir des niveaux plus faibles de Fe dans les aliments où le Fe était encapsulé pour une raison qu'on ne s'explique pas. Le fait que l'IC soit peu modifié indique que l'effet négatif proviendrait principalement d'une baisse numérique de la consommation. Akter et al (2017) ont montré dans des régimes similaires, consommés de 0 à 35 jours avec phytase, une diminution de la consommation avec 40 ppm de Fe ajouté sous forme de sulfate comparativement à un témoin sans ajout. Le GMQ était diminué dès l'ajout de 20 ppm alors que l'IC était augmenté avec 20 ppm et similaire au témoin avec 40 ppm. L'étude réalisée par Ma et al (2012) qui ajoutait 160 ppm de Fe sous forme de sulfate montrait une diminution de la consommation et du GMQ sans effet sur l'IC seulement sur la phase de 21-42 jours.

Parallèlement à cette diminution, la digestibilité jéjunale et iléale de P était augmentée par l'ajout de Fe, et ce, davantage s'il était non encapsulé (iléon, 65% vs 72%). Il en était de même pour la digestibilité jéjunale du Ca et du Fe. Cet effet est contraire à ce que nous attendions basés sur des résultats de la littérature où le Fe réduit l'utilisation du P par la formation de complexes insolubles (Maenz et al, 1999). Afin de mieux comprendre, nous avons fait la digestibilité du P phytique qui suit celle de P et expliquerait au moins en partie l'augmentation de digestibilité de P et Ca. Le Fe est bien connu, comme les autres cations divalents, pour former des complexes avec le phosphate au pH intestinal. Une hypothèse pour l'augmentation de la dégradation de P phytique serait la formation de complexes Fe-phosphate insolubles, qui auraient créé une carence chez les poulets, bien que les quantités de P ingérées fussent similaires, qui ont répondu en synthétisant de la phytase endogène. Certains auteurs ont en effet rapporté une augmentation de l'activité des phosphatases alcalines et de la phytase intestinale dans la bordure en brosse de l'intestin lorsque les animaux étaient alimentés avec un régime déficient en P (McCuaig et al.,1972; Applegate et al., 2003). Le mécanisme par lequel il y a une augmentation de l'activité de la phytase dans la bordure en brosse n'est pas clair, mais serait en lien avec l'effet du calcitriol, la molécule active de la vitamine D, qui est synthétisée lors de carence de P. Ce dernier est connu pour augmenter l'absorption de Ca, ce qui rendrait le P phytique plus accessible pour la phytase endogène en raison d'une moindre formation de complexes Ca-P phytique (Applegate et al., 2003; Cao et al., 2016). Une augmentation de la vitamine D_3 est également connue pour améliorer l'absorption du P, en stimulant le transport du P dans la lumière intestinale vers l'intérieur des entérocytes par l'intermédiaire du transporteur « NaPi transporter » (Wasserman et Taylor, 1973; Cao et al., 2016). Ceci pourrait avoir contribué à diminuer l'effet inhibiteur de la quantité de substrat sur l'activité de l'enzyme phytase. Toutefois, les résultats de digestibilité du P sont contraires à ceux d'Akter et al. (2017) qui ont observé une diminution de la digestibilité de P avec l'augmentation du Fe (0, 20, 40 ppm sulfate de Fe) dans un régime avec phytase. Ils ont de plus observé une diminution de l'effet de la phytase avec le régime 40 ppm. Le Fe se serait ainsi lié au P phytique limitant l'effet de la phytase exogène qui se fait dans le jabot et le proventricule-gésier principalement (Akter et al., 2015).

Tableau 3.8. Niveau de solubilité du phosphore excrété par les poulets en fonction de la forme et du niveau de Fe apportés dans l'aliment

	Traitements alimentaires						Probabilités			
Paramètres	**C+[1]**	**FeEnc1**	**FeENc2**	**FeNEnc1**	**FeNEnc2**	**ETR[2]**	**C+ vs., autres**	**FeEnc vs., FeNEnc**	**FeEnc1 vs., FeENc2**	**FeNEnc1 vs., FeNEnc2**
Jéjunum										
P total, g/kg MS	8,58	8,32	7,74	7,43	7,57	0,34	0,037	0,126	0,245	0,779
P soluble eau, g/kg MS	3,37	3,43	2,99	3,02	3,35	0,18	0,391	0,895	0,098	0,193
P soluble/P total	0,40	0,41	0,39	0,42	0,45	0,02	0,226	0,087	0,510	0,365
Iléon										
P total, g/Kg MS	11,94	11,81	11,35	10,47	11,09	0,42	0,116	0,065	0,454	0,301
P soluble eau, g/kg MS	2,12	2,03	1,99	1,91	1,94	0,13	0,328	0,541	0,812	0,867
P soluble/P total	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,02	0,838	0,752	0,804	0,577
Caeca										
P total, g/Kg MS	11,20	11,14	10,37	11,14	10,53	0,52	0,498	0,885	0,313	0,410
P soluble eau, g/kg MS	6,48	7,07	6,55	6,81	6,55	0,28	0,388	0,641	0,202	0,508
P soluble/P total	0,58	0,65	0,63	0,62	0,63	0,02	0,058	0,496	0,673	0,615
Litière										
P total, g/kg MS	10,33	9,90	9,44	9,41	9,73	0,40	0,114	0,810	0,432	0,564
P soluble eau, g/kg MS	2,79	3,17	3,09	3,16	3,04	0,09	0,003	0,740	0,548	0,355
P soluble/P total	0,27	0,32	0,34	0,34	0,31	0,01	0,001	0,917	0,504	0,151

[1]C+ = Témoin positif formulé selon les besoins nutritionnels en vigueur (Leeson et Summer, 2005). [2] Écart type résiduel

Dans cette étude, le niveau de P de l'aliment était plus faible (30%) que dans la présente étude. De plus, le niveau de base de Fe était de l'ordre de 60-80 ppm soit très loin de nos valeurs. Ainsi, le ratio Fe :P était plus élevé dans notre étude et aurait pu engendrer une carence plus importante en limitant davantage l'effet de la phytase exogène pas la formation de complexes Fe :PP. Les complexes Fe-PP se formeraient davantage au pH faibles de la zone gastrique où la phytase exogène agit et seraient davantage solubles au pH de l'intestin (Maenz, 1999) et ceux Fe :Phosphate s'y formeraient (Coote et Gregorich, 2000; Metcalf et Eddy, 2003).

Toutefois, bien que des valeurs de digestibilités des nutriments plus élevées puissent être observées chez les oiseaux, cette amélioration ne s'est pas répercutée favorablement sur la minéralisation osseuse. Les niveaux de P déjà très élevés dans l'aliment de type commercial avec 3,5 g de P non-phytique en moyenne avec 1500 FTU de phytase dans la phase 1 et 500 FTU/kg de phytase par la suite expliquent probablement cet effet. Au niveau des tissus, la quantité de Fe déposée dans les reins était indépendante des traitements alimentaires, alors que celle dans le foie était plus élevée à l'exception du régime Fe encapsulé dose 1. Ceci est en accord avec le fait que le foie est le principal site de stockage du Fe (Ma et al., 2012). Le Fe réduit le contenu et la densité minérale osseuse. Akter et al. (2017) ont obtenu un effet négatif de la dose élevée de Fe sur la force à la rupture du tibia, aucun effet sur la teneur en cendres et une augmentation du Fe dans l'os. Il est ainsi possible qu'après la saturation en Fe dans le foie, l'excès de Fe se déplace vers le tibia. Cette relocalisation de Fe pourrait être le résultat de l'absence d'effet du Fe sur son excrétion obtenu dans notre étude. Le Fe joue un rôle important dans la minéralisation osseuse en participant à la formation de la partie organique (collagène) de l'os et au fonctionnement des ostéoblastes. Cependant, une surcharge de Fe dans le tibia pourrait nuire à la formation osseuse en inhibant la différenciation des ostéoblastes et en conduisant à l'ostéoporose (Tsay et al., 2010; Jia et al., 2012) et serait même associée à un risque accru à la fracture osseuse (Vahl et al., 1987). Par conséquent, l'absence d'effet de traitement sur l'excrétion de Fe dans la présente étude pourrait être due à une augmentation de la concentration en Fe dans le tibia, ce qui pourrait par conséquent affecter la minéralisation osseuse et tendre à réduire le CMO.

Au niveau des litières, l'excrétion de P et Ca était réduite par l'ajout de Fe indépendamment de l'encapsulation et de la dose. Cet effet est en accord avec une digestibilité iléale accrue lors d'ajout Fe. Cependant, la digestibilité accrue dans les régimes avec Fe encapsulé n'est pas visible sur l'excrétion. Ceci est dû au fait que la consommation de P est plus faible en raison d'une CMJ réduite par l'ajout de Fe et des teneurs en P plus faibles dans ce régime si on regarde les valeurs analysées. Dans la présente étude, la teneur en P total dans la litière et les digesta du jéjunum et de l'iléon n'était pas affectée par la forme et le niveau de Fe dans le régime. L'ajout de Fe encapsulé ou non encapsulé n'a eu aucun effet sur la proportion de P soluble dans les digesta du jéjunum et de l'iléon. Par contre, la proportion de P soluble dans le jéjunum et l'iléon était légèrement diminuée lorsque le niveau de Fe encapsulé ajouté dans l'aliment passait de la dose 1 à 2. Cette réduction de solubilité

concorde avec une diminution de la digestibilité du P phytique dans le jéjunum et l'iléon observée pour le régime additionné de la dose 2, pour une raison qu'on ne s'explique pas. Pour tous les régimes alimentaires, la concentration du P soluble dans les contenus des différents segments intestinaux diminue de façon importante du jéjunum à l'iléon pour ensuite augmenter dans les caeca. Ceci est dû à l'absorption du P soluble par la muqueuse intestinale et à la remontée de pH qui provoque la formation de complexes insolubles au fur et à mesure qu'on avance dans l'intestin. Le pH est en effet un des facteurs importants qui gouvernent la formation des complexes Fe ou Ca P phytique et l'insolubilisation du P dans le tractus digestif (Maenz et al.,1999). La concentration en P soluble dans le cæcum était aussi indépendante des traitements alimentaires, mais était plus élevée que dans l'intestin, effet qui pourrait s'expliquer par l'importante activité des micro-organismes qui colonisent ces segments (Mabelebele et al., 2014). Au niveau des caeca, une tendance montrait une augmentation de la proportion de P soluble par rapport au traitement exemple de Fe (58 vs 63%).

Dans la litière, contrairement à ce qui était attendu et au résultat de l'essai précédent (Chapitre 2), la supplémentation des régimes avec le Fe encapsulé ou non encapsulé a favorisé une augmentation significative de la part soluble de P comparativement au régime témoin. Une explication plausible proviendrait de l'effet des concentrations élevées de Fe sur la minéralisation osseuse. En effet, le fait que le rôle des ostéoblastes dans la formation osseuse est compromis, les flux de P et de Ca qui proviendraient de l'augmentation de la digestibilité ou de l'hydrolyse accrue du P phytique ne peuvent plus être retenus dans les os et seront excrétés par les reins dans l'urine. Étant donné que cette forme de rejet constitue un flux de P soluble (Tsay et al., 2010), ce qui aurait comme tendance d'augmenter les concentrations de P soluble excrété compte tenu que les fèces et les urines sont mélangées chez les volailles. Le pH des litières était aux alentours de 7,5, pH ce qui va favoriser la production d'ammoniac et de protoxyde d'azote, qui en parallèle va entrainer une réduction de Fe et une libération du P dans les complexes Fe-Phosphate (Boström et al., 1988; CORPEN 2006). Cette libération de P des complexes aurait aussi pu accentuer la charge de P soluble dans la litière

3.5. Conclusion

Les résultats de la présente étude indiquent que l'ajout de sulfate de Fe encapsulé ou non dans le régime des poulets réduit les performances de croissance et ne permet pas d'insolubiliser le P des litières. Ceci serait dû principalement à l'action défavorable des concentrations très élevées de Fe sur la minéralisation osseuse et le remodelage osseux, induisant une augmentation de l'excrétion urinaire de P chez les oiseaux. Une autre explication pourrait être attribuable au pH de la litière qui est normalement alcalin (pH 7-7,5), pH qui peut favoriser la solubilisation du P lié au Fe. Un résultat inattendu est que l'ajout de Fe est efficace pour améliorer la digestibilité du P total et du Ca chez les oiseaux par une hydrolyse accrue du P phytique possiblement par une augmentation de l'activité phytasique endogène, mécanisme qui demeure à investiguer davantage.

3.6. Remerciements

Les auteurs du document désirent remercier les partenaires financiers et techniques qui ont rendu possible la réalisation de cette étude : JEFO nutrition, le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) et le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), l'Université Laval, la Faculté des sciences de l'agriculture de l'alimentation (FSAA) et le département des sciences animales (SAN)

3.7. Références

Akter, M., Iji, P. A., et Graham, H. (2017). *Increased iron level in phytase-supplemented diets reduces performance and nutrient utilisation in broiler chickens*. British *Poultry Science*, 58(4), 409–417. https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1315050.

AKTER, M., GRAHAM, H. et IJI, P.A. (2015). *Interactions between phytase and different dietary minerals in in vitro systems*. Journal of Food, Agriculture and Environment, 13: 38–44

Applegate, T. J., Angel, R., et Classen, H. L. (2003). Effect of dietary calcium, 25-hydroxycholecalciferol, or bird strain on small intestinal phytase activity in broiler chickens. *Poultry Science*, 82(7), 1140–1148. https://doi.org/10.1093/ps/82.7.1140

Applegate, T. J., Joern, B. C., Nussbaum-Wagler, D. L., et Angel, R. (2003). *Water-soluble phosphorus in fresh broiler litter is dependent upon phosphorus concentration fed but not on fungal phytase supplementation*. Poultry Science, 82(6), 1024–1029. https://doi.org/10.1093/ps/82.6.1024

Biehl, R. R., Emmert, J. L., et Baker, D. H. (1997). *Iron Bioavailability in Soybean Meal as Affected by Supplemental.* Poultry Science, 76(10), 1424–1427.

Boström, B., Andersen, J. M., Fleischer, S., et Jansson, M. (1988). *Exchange of phosphorus across the sediment-water interface*. Hydrobiologia, 170(1), 229–244. https://doi.org/10.1007/BF00024907

Bougouin, A., Appuhamy, J. A. D. R. N., Kebreab, E., Dijkstra, J., Kwakkel, R. P., et France, J. (2014*). Effects of phytase supplementation on phosphorus retention in broilers and layers*: A meta-analysis. Poultry science, 93(8), 1981-1992.

Cao, J., Luo, X. G., Henry, P. R., Ammerman, C. B., Littell, R. C., et Miles, R. D. (1996). *Effect of dietary iron concentration, age, and length of iron feeding on feed intake and tissue iron concentration of broiler chicks for use as a bioassay of supplemental iron sources*. Poultry Science, 75(4), 495–504. https://doi.org/10.3382/ps.0750495

Cao, M., Fang, R., Chen, J., et He, J. (2016). *Vitamin D3 increased intestinal Na/Pi-IIb and CYP27B1 mRNA level in rats fed low-phosphorus diets*. Animal Nutrition, 2(3), 211–217. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.06.001

Coote, D., et Gregorich, L. J. (2000). *The health of our water*: Towards sustainable agriculture in Canada.

Corpen. 2006. *Estimation des Rejets d'Azote, Phosphore, Potassium, Calcium, Cuivre et Zinc par les Élevages Avicoles*. *Collection CORPEN: Paris*

Correll, D. L. (1998*). The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review*. Journal of Environment Quality, 27(2), 261. https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x

CPVQ, 1996. *Échantillonnage des engrais de ferme*. Bulletin technique 25. AGDEX 538. *CRAAQ,* 1996. 16 pages.

DeLaune, P., et Moore, P. (2004). *Development of a phosphorus index for pastures fertilized with poultry litter; Factors affecting phosphorus runoff.* Journal of Environnemental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/33/6/2183

Dilger, R. N. (2004*). Estimation of True Phosphorus Digestibility and Endogenous Phosphorus Loss in Growing Chicks Fed Conventional and Low-Phytate Soybean Meals* , (2001), 661–668.

FASS, *Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Research and Teaching*, 3rd edition, January 2010. (www.fass.org/docs/agguide3rd/Ag_Guide_3rd_ed.pdf)

Hall, L. E., Shirley, R. B., Bakalli, R. I., Aggrey, S. E., Pesti, G. M., et Edwards, H. M. (2003). *Power of two methods for the estimation of bone ash of broilers*. Poultry Science, 82(3), 414–418. https://doi.org/10.1093/ps/82.3.414

Jia, P., Xu, Y. J., Zhang, Z. L., Li, K., Li, B., Zhang, W., et Yang, H. (2012). *Ferric ion could facilitate osteoclast differentiation and bone resorption through the production of reactive oxygen species*. *Journal of Orthopaedic Research*, 30(11), 1843–1852. https://doi.org/10.1002/jor.22133

Ma, W., Sun, H., Zhou, Y., Wu, J., et Feng, J. (2012). *Effects of iron glycine chelate on growth, tissue mineral concentrations, fecal mineral excretion, and liver antioxidant enzyme activities in broilers. Biological Trace Element Research*. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s12011-012-9418-5

Mabelebele, M., Alabi, O. J., Ng'ambi, J. W., Norris, D., et Ginindza, M. M. (2014). *Comparaison of Gastrointestinal Tracts and pH Value of Digestive Organs of Ross 308 broiler and rustical strain fed the same diet.pdf*. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*.

Maenz, D. D., Engele-Schaan, C. M., Newkirk, R. W., et Classen, H. L. (1999). *The effect of minerals and mineral chelators on the formation of phytase-resistant and phytase-susceptible forms of phytic acid in solution and in a slurry of canola meal.* Animal Feed Science and Technology, 81(3–4), 177–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00085-1

McCarthy, J. F., Aherne, F. X., et Okai, D. B. (1974). *Use of HCl insoluble ash as an index material for determining apparent digestibility with pigs.* Canadian Journal of Animal Science, 54(1), 107-109.

McCuaig, L. W., et Motzok, I. (1972). *Regulation of intestinal alkaline phosphatase by dietary phosphate. Canadian journal of physiology and pharmacolog*y, 50(12), 1152-1156.

McKie, V. A., et McCleary, B. V. (2016*). A novel and rapid colorimetric method for measuring total phosphorus and phytic acid in foods and animal feeds.* Journal of AOAC International, 99(3), 738–743. https://doi.org/10.5740/jaoacint.16-0029

MDDELCC. (2016). *Règlement sur les exploitations agricoles*. Retrieved from http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/guide-reference-REA.pdf

Metcalf, E. E., et Eddy, H. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. New York: McGRaw

Miles, D. M., Moore, P. a, Smith, D. R., Rice, D. W., Stilborn, H. L., Rowe, D. R., … Simmons, J. D. (2003). *Total and water-soluble phosphorus in broiler litter over three flocks with alum litter treatment and dietary inclusion of high available phosphorus corn and phytase supplementation*. *Poultry Science*, 82(10), 1544–1549. https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1544

Mutucumarana, R. K., Ravindran, V., Ravindran, G., et Cowieson, A. J. (2015). *Measurement of true ileal phosphorus digestibility in maize and soybean meal for broiler chickens*: Comparison of two methodologies. Animal Feed Science and Technology, 206. https://doi.org/10.1016/j.*anifeedsci.*2015.05.011

Ondreicka, R., J. K. et E. G. (1971). *Aluminum, its absorption, distribution and effects in phosphorus metabolism.* In: S. C. Skoryna and D. Waldron-Edward (Ed.) Intestinal Absorption of Metal Irons, Trace Elements, and Radionuclides. Oxford, 200, p 293. Pergamon Press.

Rodehutscord, M. (2013). *Determination of phosphorus availability in poultry*. World's Poultry Science Journal, 69(3), 687–698. https://doi.org/10.1017/S0043933913000688

Selle, P. H., et Ravindran, V. (2007). *Microbial phytase in poultry nutrition.* Animal Feed Science and Technology, 135(1–2), 1–41. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.010

Tsay, J., Yang, Z., Ross, F. P., Cunningham-Rundles, S., Lin, H., Coleman, R.,et Vogiatzi, M. G. (2010). *Bone loss caused by iron overload in a murine model: importance of oxidative stress*. Blood, 116(14), 2582–2589. https://doi.org/10.1182/blood-2009-12-260083

Vadas, P. a, Meisinger, J. J., Sikora, L. J., McMurtry, J. P., et Sefton, a E. (2004). *Effect of poultry diet on phosphorus in runoff from soils amended with poultry manure and compost*. Journal of Environmental Quality, 33(5), 1845–54. https://doi.org/10.2134/jeq2004.1845

Vadas, P. A., et Kleinman, P. J. A. (2006). *Effect of methodology in estimating and interpreting water-extractable phosphorus in animal manures*. Journal of Environmental Quality, 35(4), 1151–1159. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0332

Vahl, H. A., et van 'T Klooster, A. T. (1987). *Dietary iron and broiler performance*. British Poultry Science, 28(4), 567–76. https://doi.org/10.1080/00071668708416992

Waldroup, P. (1999). *Nutritional approaches to reducing phosphorus excretion by poultry*. Poultry Science, 78(5), 683–691. https://doi.org/10.1093/ps/78.5.683

Wasserman, R. H., et Taylor, A. N. (1973). *Intestinal absorption of phosphate in the chick: effect of vitamin D3 and other parameters*. The Journal of nutrition, 103(4), 586-599.

Zotti, A., Rizzi, C., Chiericato, G., et Bernardini, D. (2003). *Accuracy and precision of dual-energy X-ray absorptiometry for ex vivo determination of mineral content in Turkey poult bones*. Veterinary Radiology and Ultrasound, 44(1), 49–52. https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2003.tb01448.x

CHAPITRE IV

DISCUSSIONS GÉNÉRALES

Les productions animales sont depuis plusieurs années déjà la cible d'une critique soutenue dans les régions à fortes densités d'élevage comme le Québec en raison de la difficulté de recycler efficacement les rejets en nutriments, plus particulièrement en P. En vertu du règlement sur les exploitations agricoles en vigueur au Québec (REA, 2005; 2016), ces rejets engendrent des coûts parfois très importants aux producteurs de porcs et de volailles. Plusieurs méthodes efficaces, dont la réduction de P à la source dans l'alimentation et l'ajout de phytase microbienne, sont largement utilisées aujourd'hui pour minimiser les rejets de P. Cependant, malgré la généralisation de ces méthodes, plus de 40 à 50 % du P ingéré est toujours excrété. De plus, certaines études montrent une augmentation de la proportion de P soluble dans les effluents, forme engendrant des problèmes environnementaux tels les algues bleu-vert. Cette augmentation du P soluble serait particulièrement critique avec l'augmentation de la digestibilité du P via l'alimentation par l'utilisation de phytase et de drêches sans réduction des marges de sécurité. Par conséquent, l'objectif général de ce travail de maîtrise était d'évaluer la possibilité d'introduire des sels métalliques encapsulés dans l'alimentation des poulets pour insolubiliser le P non absorbé par l'animal et ainsi réduire le P soluble excrété et les problèmes environnementaux associés sans compromettre leurs performances.

Comme preuve de concept, une première expérience a permis d'évaluer l'impact de l'ajout de sulfate de Fe et d'aluminium encapsulés dans l'alimentation des poulets de chair sur l'excrétion de P soluble et la rétention de P et de Ca. Les résultats montrent que l'ajout du Fe et d'Al encapsulés peut réduire jusqu'à 25 % l'excrétion de P soluble dans les fientes des poulets sans modifier les performances de croissance et la rétention des nutriments (P, Ca et Fe). Ceci serait dû à la formation de complexes Fe/Al et phytates et phosphate-insolubles après qu'une partie significative du P ait été absorbée et donc sans effet négatif sur l'absorption et la rétention du P alimentaire.

Dans une seconde expérience, le sulfate de Fe a été préféré au sulfate d'Al compte tenu qu'il est déjà permis par l'ACIA[1]. Cette expérience visait à évaluer la nécessité ou non de la micro-encapsulation en comparant la digestibilité des minéraux, la minéralisation osseuse, l'accumulation dans les tissus et la proportion de P soluble dans les litières à la fin de l'élevage. Les résultats ont révélé que l'ajout de sulfate de Fe encapsulé ou non dans le régime des poulets réduit les performances de croissance et la minéralisation osseuse et ne permet pas d'insolubiliser le P des litières. Un résultat inattendu est que l'ajout de Fe est efficace pour améliorer la digestibilité du P total et du Ca chez les oiseaux. Ceci est lié en partie à une augmentation du l'hydrolyse du P phytique possiblement par une augmentation de l'activité phytasique endogène. Étant donné que le supplément de Fe a limité la formation osseuse, cette amélioration de la digestibilité ne s'est pas répercutée favorablement sur la minéralisation osseuse et a de plus contribué à augmenter les flux d'excrétion urinaire de P (majoritairement sous forme soluble) et par conséquent la quantité de P soluble dans la litière.

[1] ACIA: Agence Canadienne d'Inspection des Aliments

Une des raisons de la discordance entre les résultats de ces deux expériences pourrait provenir des niveaux de Fe alimentaires. En effet, les niveaux de Fe de la seconde expérience étaient 2 fois plus élevés que ceux de la première expérience (x et x ppm). Ceci est probablement dû au niveau plus élevé de Fe que prévu apporté par les ingrédients utilisés dans la fabrication des aliments (par exemple phosphate monocalcique et le premix minéral). Une autre explication pour les résultats divergents entre les deux études pourrait provenir des changements de pH qui s'effectue dans la litière. En effet, le pH est un des facteurs importants qui gouvernent la formation des complexes Fe, Al ou Ca-P phytique. Pour vérifier cet effet, un échantillon d'excréta des poulets alimentés avec les régimes C-, C+, Fe et Al de l'essai 1 ont été sélectionnés au hasard et introduits dans 4 solutions tampon (pH 3, 6, 7 et 9) et la quantité de P soluble a été mesurée après 3 heures. Les résultats montrent un retour très important en solution pour tous les traitements à pH supérieurs à 6, mais dans une proportion plus grande pour le Fe (Figure 3.2). Or, le pH des litières est normalement alcalin et se situe aux alentours de 7,0 à 7,5, pH ce qui va favoriser la production d'ammoniac et de protoxyde d'azote, qui en parallèle va entrainer une réduction de Fe et une libération du P sous forme soluble des complexes Fe-PO_4^{3-}.

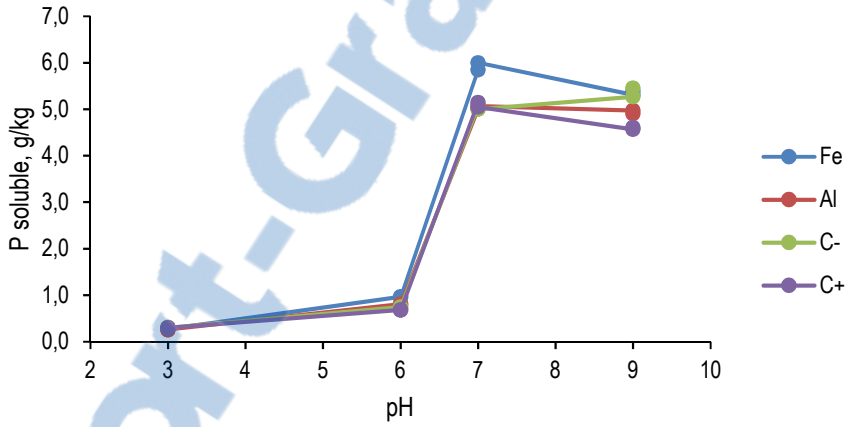


Figure 3.2. Effet du pH sur la quantité de P soluble des excréta

Rapport-Gratuit.com

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Comme prévu, la micro-encapsulation a permis de libérer les sels métalliques de Fe et d'Al dans la partie distale du tube digestif. Cependant, son impact sur la proportion de P soluble ainsi que sur les performances des poulets est fonction plusieurs paramètres importants dont le niveau d'ingrédients ajoutés et les conditions expérimentales. Par exemple, dans les conditions d'élevages en cages sans supplémentation de phytase, l'ajout de Fe dans l'aliment réduit le P soluble des fientes. Tandis qu'en conditions commerciales avec phytase et litières ajoutées, le Fe améliore la digestibilité de P total et phytique et augmente la proportion de P soluble des fientes de poulets. L'hypothèse la plus plausible pour expliquer cette augmentation a été basé sur une diminution de la minéralisation osseuse par le Fe. Davantage de travaux seront nécessaire afin de mieux comprendre le mécanisme et de revalider cette hypothèse. L'amélioration de la digestibilité des minéraux (P, Ca et Fe) avec des doses élevées de Fe est également un mécanisme qui demeure à investiguer davantage pour comprendre les réponses métaboliques engendrées chez les poulets.

Ce travail de maitrise représentait une première étape permettant d'évaluer le potentiel de l'encapsulation pour relarguer les ingrédients actifs en aval des sites d'absorption et mieux comprendre les mécanismes qui gouvernent le devenir du P dans le tube digestif. Les connaissances générées dans ce travail de maitrise sont des pistes qui guideront les futures études vers le choix de d'autres ingrédients actifs (ex. : sels de Ca) pour maintenir le P sous forme insoluble dans les litières.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

RÉFÉRENCES GÉNÉRALES

Agra 2016, *Phosphates for animal Feed and nutrition 2016,* disponible sur : http://foodchemicalnewspromo.agra-net.com/files/2016/04/AP-Phosphates-Animal-Feed-Nutrition-2016-MARKETING.pdf

Ajskaiye, A., M.Z. Fan, T. Archbold, R.R. Hacker, C.W. Forsberg, et J.P. Phillips. (2003). *Determination of true digestive utilization of phosphorus and the endogenous phosphorus outputs associated with soybean meal for growing pigs*. J. Anim. Sci. 81:2766–2775.

Akter, M., Iji, P. A., &et Graham, H. (2017). *Increased iron level in phytase-supplemented diets reduces performance and nutrient utilisation in broiler chickens*. British Poultry Science, 58(4), 409–417. https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1315050

Akter, M., Iji, P. A., et& Graham, H. (2017). *Increased iron level in phytase-supplemented diets reduces performance and nutrient utilisation in broiler chickens*. British Poultry Science, 58(4), 409–417. https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1315050

Angel C. Roselina, Wendy J. Powers,* Todd J. Applegate, Nada M. Tamim, and M. C. C. (2005*). Influence of Phytase on Water-Soluble Phosphorus in Poultry and Swine Manure*. J. Environ. Qual, (34), 563–571.

Angel R. C.,Wendy J. Powers, Todd J. Applegate, Nada M. et Tamim et M. C. C. (2005). *Influence of Phytase on Water-Soluble Phosphorus in Poultry and Swine Manure*. Poultry Science, 34(6), 1359–1364. http://doi.org/10.3382/ps.0751359

Angel, R., Saylor, W. W., Mitchell, A. D., Powers, W., et& Applegate, T. J. (2006). *Effect of Dietary Phosphorus, Phytase , and 25-Hydroxycholecalciferol on Broiler Chicken Bone Mineralization , Litter Phosphorus , and Processing Yields.* Poultry Science, 85, 1200–1211.

Applegate T. J., Joern, B. C., Nussbaum-Wagler, D. L., et Angel, R. (2003). *Water-soluble phosphorus in fresh broiler litter is dependent upon phosphorus concentration fed but not on fungal phytase supplementation.* Poultry Science, 82(6), 1024–1029. http://doi.org/10.1093/ps/82.6.1024

Applegate, T. J., Angel, R., et& Classen, H. L. (2003). *Effect of dietary calcium, 25-hydroxycholecalciferol, or bird strain on small intestinal phytase activity in broiler chickens*. Poultry Science, 82(7), 1140–1148. https://doi.org/10.1093/ps/82.7.1140

Applegate, T. J., Joern, B. C., Nussbaum-Wagler, D. L., et& Angel, R. (2003*). Water-soluble phosphorus in fresh broiler litter is dependent upon phosphorus concentration fed but not on fungal phytase supplementation.* Poultry Science, 82(6), 1024–1029. https://doi.org/10.1093/ps/82.6.1024

Askelson, T. E., Campasino, A., Lee, J. T., et & Duong, T. (2014*). Evaluation of phytate-degrading Lactobacillus culture administration to broiler chickens.* Applied and environmental microbiology, 80(3), 943-950.

Babatunde, A. O., Zhao, Y. Q., Burke, A. M., Morris, M. A., et& Hanrahan, J. P. (2009). *Characterization of aluminium-based water treatment residual for potential phosphorus removal in engineered wetlands*. Environmental Pollution, 157(10), 2830-2836.

Beaudet, P., Beaudin, I., Michaud, A., et& Giroux, M. (2008). Le transport du phosphore. Fiche technique, (3).

Beaulieu, R. (s. d.). *L'aspect réglementaire en agroenvironnement : concepts qui sous-tendent la réglementation et objectifs visés*. http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/prod-porcine/documents/BIO98-4.pdf (Page consultée le 16 mars 2013)

Biehl, R. R., Emmert, J. L., &et Baker, D. H. (1997). *Iron Bioavailability in Soybean Meal as Affected by Supplemental*. Poultry Science, 76(10), 1424–1427.

Bilodeau, R. 1998. *Le potentiel de réduction des rejets en azote et en phosphore* : Production procine. Agri-Vision - MAPAQ – CPAQ. Inc. 69-80.

Boiral, O. (2005). *Concilier environnement et compétitivité, ou la quête de l'éco-efficience*. Revue Française de Gestion, 31(158), 163–186. https://doi.org/10.3166/rfg.158.163-186

Boström, B., Andersen, J. M., Fleischer, S., et Jansson, M. (1988). *Exchange of phosphorus across the sediment-water interface*. Hydrobiologia, 170(1), 229–244. https://doi.org/10.1007/BF00024907

Bougouin, A., Appuhamy, J. A. D. R. N., Kebreab, E., Dijkstra, J., Kwakkel, R. P., et France, J. (2014). *Effects of phytase supplementation on phosphorus retention in broilers and layers* : A meta-analysis, (November).

C. Roselina Angel, Wendy J. Powers,* Todd J. Applegate, Nada M. Tamim, and M. C. C. (2005*). Influence of Phytase on Water-Soluble Phosphorus in Poultry and Swine Manure*. Poultry Science, 34(6), 1359–1364. https://doi.org/10.3382/ps.0751359

Cao, J., Luo, X. G., Henry, P. R., Ammerman, C. B., Littell, R. C., et Miles, R. D. (1996*). Effect of dietary iron concentration, age, and length of iron feeding on feed intake and tissue iron concentration of broiler chicks for use as a bioassay of supplemental iron source*s. Poultry Science, 75(4), 495–504. http://doi.org/10.3382/ps.0750495

Cao, M., Fang, R., Chen, J., et& He, J. (2016). *Vitamin D3 increased intestinal Na/Pi-IIb and CYP27B1 mRNA level in rats fed low-phosphorus diets*. Animal Nutrition, 2(3), 211–217. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.06.001

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) (2003). *« Charges fertilisantes des effluents d'élevage, cas des productions des volailles de chair* ». [En ligne]. [Http://pub.craaq.qc.ca/Transit/7-Volaille.pdf]. Page consultée le 17 octobre 2016.

Cheng, T. K., Hamre, M. L., et& Coon, C. N. (1997*). Effect of environmental temperature, dietary protein, and energy levels on broiler performance*. Journal of Applied Poultry Research, 6(1), 1-17.

Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois (2006). *Présentation du mémoire des Éleveurs de volaille du Québec*

Coote, D., et& Gregorich, L. J. (2000). *The Health Of Our Water*: Towards sustainable agriculture in Canada.

Corpen. 2006. *Estimation des Rejets d'Azote, Phosphore, Potassium, Calcium, Cuivre et Zinc par les Elevages Avicoles*. Collection CORPEN : Paris

Correll, D. L. (1998). *The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review*. Journal of Environment Quality, 27(2), 261. http://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x

Courbebaisse, M., et& Souberbielle, J. C. (2011). *Équilibre phosphocalcique : régulation et explorations. Nephrologie et Therapeutique*, 7(2), 118–138. https://doi.org/10.1016/j.nephro.2010.12.004

CPVQ, 1996. *Échantillonnage des engrais de ferme*. Bulletin technique 25. AGDEX 538. CRAAQ, 1996. 16 pages.

Dao, T. (2003*). Polyvalent cation effects on-inositol hexa-dihydrogenphosphate enzymatic dephosphorylation in dairy wastewater. Journal of Environmental Quality.* Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/32/2/694

Dao, T. H. (2003). *Polyvalent cation effects on myo-inositol hexakis dihydrogenphosphate enzymatic dephosphorylation in dairy wastewater*. Journal of Environmental Quality, 32(2), 694–701. https://doi.org/10.2134/jeq2003.6940

Dao, T. H. (2004). *Organic ligand effects on enzymatic dephosphorylation of myo-inositol hexakis dihydrogenphosphate in dairy wastewater*. Journal of Environmental Quality, 33(1), 349–357. https://doi.org/10.2134/jeq2004.3490

Dao, T. H. (2006). 11 *Ligand Effects on Inositol Phosphate Solubility and Bioavailability in Animal Manures. Inositol phosphates*: Linking agriculture and the environment, 169.

Dao, T., Sikora, L., et& Hamasaki, A. (2001). *Manure phosphorus extractability as affected by aluminum-and iron by-products and aerobic composting.* Journal of. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/30/5/1693

Dao, T., Sikora, L., et Hamasaki, A. (2001). *Manure phosphorus extractability as affected by aluminum-and iron by-products and aerobic composting*. Journal of. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/30/5/1693

Davies M.I., Ritcey G.M., Motzok I.*: Intestinal and alkaline phosphatase of chicks: Influence of dietary magnesium, calcium, phosphorus and vitamin D*. Poult. Sci., 1970, 49, 1280-1286.

Davis, P.N., Norris, L.C. et& Kratzer, F.H. (1968) *Iron utilization and metabolism in the chick*. Journal of Nutrition, 94: 407-417.

DeLaune, P., et Moore, P. (2004*). Development of a phosphorus index for pastures fertilized with poultry litter; Factors affecting phosphorus runoff*. Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/33/6/2183

Deobald, H. J., et Elvehjem, C. A. (1935). *The effect of feeding high amounts of soluble iron and aluminum salts.* American Journal of Physiology--Legacy Content, 111(1), 118-123.

Deobald, H. J., etand Elvehjem, C. A. (1935). *The effect of feeding high amounts of soluble iron and aluminum salts*. American Journal of Physiology--Legacy Content, 111(1), 118-123.

Dilger, R. N. (2004). *Estimation of True Phosphorus Digestibility and Endogenous Phosphorus Loss in Growing Chicks Fed Conventional and Low-Phytate Soybean Meals* , (2001), 661–668.

Do, J. C., Choi, I. H., et& Nahm, K. H. (2005). *Effects of Chemically Amended Litter on Broiler Performances, Atmospheric Ammonia Concentration, and Phosphorus Solubility in Litter*. Poultry Science, 84(5), 679–686. Retrieved from http://search.proquest.com/docview/223155856?accountid=11233

Dourmad, J.-Y. (2012). *Influence des pratiques d'élevage sur l'impact environnemental des systèmes de production porcine*. Journées Recherche Porcine, (44), 115–126.

Driver, J. P., Pesti, G. M., Bakalli, R. I., et Edwards, H. M. (2005). *Effects of calcium and nonphytate phosphorus concentrations on phytase efficacy in broiler chicks*. Poultry Science, 84(9), 1406–1417. http://doi.org/10.1093/ps/84.9.1406

Duke, G. E. (1997). *Gastrointestinal physiology and nutrition in wild birds*. Proceedings of the Nutrition Society, 56(3), 1049-1056.

Edwards, D. R., et Daniel, T. C. (1993*). Effects of poultry litter application rate and rainfall intensity on quality of runoff from fescuegrass plots*. Journal of Environment Quality, 22(2), 361–365. http://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200020017x

Elliot, M. a, et& Edwards, H. M. (1991). *Some effects of dietary aluminum and silicon on broiler chickens*. Poultry Science, 70(6), 1390–402. https://doi.org/10.3382/ps.0701390

Elwinger, K., Fisher, C., Jeroch, H., Sauveur, B., Tiller, H., et& Whitehead, C. C. (2016). *A brief history of poultry nutrition over the last hundred years*. World's Poultry Science Journal, 72(December), 1–20. https://doi.org/10.1017/S004393391600074X

Engberg, R. M., Hedemann, M. S., et& Jensen, B. B. (2002). *The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity in the digestive tract of broiler chickens*. British poultry science, 43(4), 569-579.

Espagnol, S., et& Leterme, P. (2010). *Élevages et environnement*. Éditions Quae.France Paris. 260 pg

Estevez, P. B., et& Domon, G. (n.d.). *Les enjeux sociaux de l'agriculture durable Un débat de société nécessaire* ? Une perspective nord-américaine.

Fan, M.Z., T. Archbold, K. Mead, etand Y. Gao. 2000. *Partitioning various forms of phosphorus in the distal ileal digesta and feces*. Can. J. Anim. Sci. 80:780 (abstract).

FASS, Guide for the Care and Use of Agricultural Animals in Research and Teaching, 3rd edition, January 2010. (www.fass.org/docs/agguide3rd/Ag_Guide_3rd_ed.pdf)

Fernández, J. (1995). *Calcium and phosphorus metabolism in growing pigs*. III. A model resolution. Livestock Production Science, 41(3), 255-261.

Flaten, D., Snelgrove, K., et Halket, I. (2003). *Acceptable phosphorus concentrations in soils and impact on the risk of phosphorus transfer from manure amended soils to surface waters*. Review of Literature. Retrieved from http://www.prairieswine.com/pdf/2898.pdf

Groupe Agéco (2014) : «*structures des exploitations agricoles au québec : Évolution structurelle et comparaison avec certains concurrents*». [En ligne]. [Http://www.aginac.com/client/publications/RapportSynthese_EvolutionEtDiversiteModelesExploitationsAgricoles_140602.pdf.]. Page consulté le 15 février 2017

Hall, L. E., Shirley, R. B., Bakalli, R. I., Aggrey, S. E., Pesti, G. M., et Edwards, H. M. (2003). *Power of two methods for the estimation of bone ash of broilers*. Poultry Science, 82(3), 414–418. https://doi.org/10.1093/ps/82.3.414

Herpol, C., et Van Grembergen, G. (1967). *La signification du pH dans le tube digestif de gallus domesticus. In Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* (Vol. 7, No. 1, pp. 33-38). EDP Sciences.

Hsu, P. H. (1976). *Comparison of iron (III) and aluminum in precipitation of phosphate from solution*. Water Research, 10(10), 903-907.

Huff, W. E., Moore, P. a, Waldroup, P. W., Waldroup, a L., Balog, J. M., Huff, G. R., et … Raboy, V. (1998). *Effect of dietary phytase and high available phosphorus corn on broiler chicken performance*. Poultry Science, 77(12), 1899–1904. http://doi.org/10.1093/ps/77.12.1899

Huff, W. E., Moore, P. a., Balog, J. M., Bayyari, G. R., et Rath, N. C. (1996*). Evaluation of the Toxicity of Alum (Aluminum Sulfate) in Young Broiler Chickens.* Poultry Science, 75(11), 1359–1364. https://doi.org/10.3382/ps.0751359

Hurwitz, S., et Bar, a. (1971). *Calcium and phosphorus interrelationships in the intestine of the fowl*. J Nutr, 101(5), 677–685. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5577902

Hurwitz, S., et Bar, A. (1965). *Absorption of calcium and phosphorus along the gastrointestinal tract of the laying fowl as influenced by dietary calcium and egg shell formation*. The Journal of Nutrition, 86(840), 433–438.

Hurwitz, S., et Bar, A. (1970). *The sites of calcium and phosphate absorption in the chick*. Poultry science, 49(1), 324-325.

Jamieson, A., Madramootoo, C. A., et Enright, P. (2003*). Phosphorus losses in surface and subsurface runoff from a snowmelt event on an agricultural field in Quebec*. Canadian Biosystems Engineering, 45, 1-1.

Jia, P., Xu, Y. J., Zhang, Z. L., Li, K., Li, B., Zhang, W., et& Yang, H. (2012). Ferric ion could facilitate osteoclast differentiation and bone resorption through the production of reactive oxygen species. Journal of Orthopaedic Research, 30(11), 1843–1852. https://doi.org/10.1002/jor.22133

Jiménez-Moreno, E., González-Alvarado, J. M., Lázaro, R., et Mateos, G. G. (2009*). Effects of type of cereal, heat processing of the cereal, and fiber inclusion in the diet on gizzard pH and nutrient utilization in broilers at different ages*. Poultry Science, 88(9), 1925-1933.

Jorquera, M., MARTíNEZ, O. S. C. A. R., Maruyama, F., Marschner, P., et de la Luz Mora, M. (2008). *Current and future biotechnological applications of bacterial phytases and phytase-producing bacteria*. Microbes and environments, 23(3), 182-191.

Józefiak, D., Engberg, R. G., et Ptak, A. (2016*). Relevance of gut microbiome and endogenous phosphatases on phytate breakdown in poultry–implications on phosphorus utilisation*. In Phytate Destruction-Consequences for Precision Animal Nutrition (pp. 33-44).

Kerovuo, J., Lauraeus, M., Nurminen, P., Kalkkinen, N., et& Apajalahti, J. (1998). *Isolation, characterization, molecular gene cloning, and sequencing of a novel phytase from Bacillus subtilis*. Applied and environmental microbiology, 64(6), 2079-2085.

Kim, Y. O., Kim, H. K., Bae, K. S., Yu, J. H., et Oh, T. K. (1998*). Purification and properties of a thermostable phytase from Bacillus sp. DS11.* Enzyme and Microbial Technology, 22(1), 2-7.

Klis, J. Van der, et Versteegh, H. (1996). *Phosphorus nutrition of poultry*. Retrieved from http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB9712275

Klopfenstein, T., et Angel, R. (2002*). Animal diet modification to decrease the potential for nitrogen and phosphorus pollution.* Faculty Papers and …. Retrieved from http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1518&etcontext=animalscifacpub

Les Éleveurs de Volailles du Québec (2015). « *Statistiques sur la production de volailles au Québec pour l'année 2015* ». [En ligne]. [http://volaillesduquebec.qc.ca/elevage/portrait/statistiques/statistiques-2015]. Page consulté le 15 février 2017.

Lescoat, P., Travel, A., et Nys, Y. (2005). *Lois de réponses des volailles de chair à l'apport de phosphore*. Productions animales, 18(3), 193–201.

Lesson, S. and J.D. Summers, 2001. Nutrition of the Chicken. 4 ed., pp. 112-125.

Letourneau Montminy, M. P. (2009). *Modélisation de métabolisme phosphocalcique chez le porc et le poulet en croissanc*e (Doctoral dissertation, Institut national agronomique Paris-Grignon).

Létourneau-Montminy, M. P., Jondreville, C., Sauvant, D., et Narcy, A. (2012*). Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase*. animal, 6(10), 1590-1600.

Létourneau-Montminy, M. P., Narcy, A., Lescoat, P., Magnin, M., Bernier, J. F., Sauvant, D., ... et Pomar, C. (2011*). Modeling the fate of dietary phosphorus in the digestive tract of growing pigs.* Journal of Animal Science, 89(11), 3596-3611.

Leytem, A. B., Kwanyuen, P., et Thacker, P. (2008). *Nutrient excretion, phosphorus characterization, and phosphorus solubility in excreta from broiler chicks fed diets containing graded levels of wheat distillers grains with solubles.* Poultry Science, 87(12), 2505–2511. https://doi.org/10.3382/ps.2008-00052

Ma, W., Sun, H., Zhou, Y., Wu, J., et Feng, J. (2012). Effects of iron glycine chelate on growth, tissue mineral concentrations, fecal mineral excretion, and liver antioxidant enzyme activities in broilers. Biological Trace Element Research. Retrieved from http://link.springer.com/article/10.1007/s12011-012-9418-5

Mabelebele, M., Alabi, O. J., Ng'ambi, J. W., Norris, D., et Ginindza, M. M. (2014). Comparaison of Gastrointestinal Tracts and pH Value of Digestive Organs of Ross 308 broiler and rustical strain fed the same diet.pdf. Asian Journal of Animal and Veterinary Advances.

Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., et Desobry, S. (2006). *Flavour encapsulation and controlled release - A review.* International Journal of Food Science and Technology, 41(1), 1–21. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x

Maenz, D. D., Engele-Schaan, C. M., Newkirk, R. W., et Classen, H. L. (1999). *The effect of minerals and mineral chelators on the formation of phytase-resistant and phytase-susceptible forms of phytic acid in solution and in a slurry of canola meal.* Animal Feed Science and Technology, 81(3–4), 177–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00085-1

Maenz, D. D., Engele-Schaan, C. M., Newkirk, R. W., et Classen, H. L. (1999). The effect of minerals and mineral chelators on the formation of phytase-resistant and phytase-susceptible forms of phytic acid in solution and in a slurry of canola meal. Animal Feed Science and Technology, 81(3–4), 177–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00085-1

Maguire, R. O., Crouse, D. A., et Hodges, S. C. (2007). *Diet modification to reduce phosphorus surpluses: A mass balance approach*. Journal of environmental quality, 36(5), 1235-1240.

Maguire, R. O., Hesterberg, D., Gernat, A., Anderson, K., Wineland, M., et Grimes, J. (2006). *Liming poultry manures to decrease soluble phosphorus and suppress the bacteria population.* Journal of Environmental Quality, 35(3), 849–57. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0339

Maguire, R. O., Sims, J. T., McGrath, J. M., et Angel, C. R. (2003). *Effect of phytase and vitamin D metabolite (25OH-D3) in turkey diets on phosphorus solubility in manure-amended soils*. Soil Science. http://doi.org/10.1097/00010694-200306000-00004

Maguire, R., Dou, Z., et Sims, J. (2005). *Dietary strategies for reduced phosphorus excretion and improved water quality*. Journal of. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/34/6/2093

Maguire, R., et Sims, J. (2004). *Influence of phytase addition to poultry diets on phosphorus forms and solubility in litters and amended soils.* Journal of …. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/33/6/2306

Martinez Amezcua, C., Parsons, C. M., et Noll, S. L. (2004). *Content and relative bioavailability of phosphorus in distillers dried grains with solubles in chicks*. Poultry Science, 83(1972), 971–976. https://doi.org/10.1093/ps/83.6.971

McCarthy, J. F., Aherne, F. X., et Okai, D. B. (1974). Use of HCl insoluble ash as an index material for determining apparent digestibility with pigs. Canadian Journal of Animal Science, 54(1), 107-109.

McCuaig, L. W., et Motzok, I. (1972). Regulation of intestinal alkaline phosphatase by dietary phosphate. Canadian journal of physiology and pharmacology, 50(12), 1152-1156.

McGrath, J. M., Sims, J. T., Maguire, R. O., Saylor, W. W., Angel, C. R., et Turner, B. L. (2005). *Broiler diet modification and litter storage:* impacts on phosphorus in litters, soils, and runoff. Journal of Environmental Quality, 34(5), 1896–909. https://doi.org/10.2134/jeq2004.0413

McKie, V. A., et McCleary, B. V. (2016). A novel and rapid colorimetric method for measuring total phosphorus and phytic acid in foods and animal feeds. Journal of AOAC International, 99(3), 738–743. https://doi.org/10.5740/jaoacint.16-0029

MCNAUGHTON, J.L. et DAY, E.J. (1979) *Effect of dietary Fe to Cu ratios on hematological and growth responses of broiler chickens*. Journal of Nutrition, 109: 559-564.

MDDELCC. (2016). *Règlement sur les exploitations agricoles*. Retrieved from http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/guide-reference-REA.pdf

Mellef, J., Dridi, A., Bahri, L. El, et Belhaj, O. (2010). *Revue des effets de l'ajout de phytase microbienne sur la biodisponibilité du phosphore et les performances des volailles*. Revue de Medecine. Retrieved from http://www.revmedvet.com/2010/RMV161_342_352.pdf

Menar, A. B., &et Jenkins, D. (1970*). Fate of phosphorus in waste treatment processes: Enhanced removal of phosphate by activated sludge*. Environmental science &et technology, 4(12), 1115-1121.

Meschy, F., Jondreville, C., Dourmad, J. Y., Narcy, A., et Nys, Y. (2008*). Maitrise des rejets de phosphore dans les effluents d'élevage.* Productions Animales, 21(1), 79–86.

Metcalf, E. E., et Eddy, H. (2003). *Wastewater engineer treatment disposal*, reuse. New York: McGRaw

Miles, D. M., Moore, P. a, Smith, D. R., Rice, D. W., Stilborn, H. L., Rowe, D. R et., … Simmons, J. D. (2003). *Total and water-soluble phosphorus in broiler litter over three flocks with alum litter treatment and dietary inclusion of high available phosphorus corn and phytase supplementation*. *Poultry Science*, 82(10), 1544–1549. https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1544

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (2011). « *Monographie de l'industrie de la volaille au Québec.* ». [En ligne]. [Https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Volaille.pdf.]. Page consulté le 15 février 2017.

Ministe re du De veloppement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. *Guide de re fe rence du Re glement sur les exploitations agricoles*. 2016. 182 pages. [En ligne]. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/guide-reference-REA.pdf (page consulte e le jour/mois/anne e).

Ministère Du Développement durable, De L'environnement Et De la Lutte Contre Les Changements climatiques. (2013). « *Rapport sur l'état de l'eau et des écosystèmes aquatiques au Québec* ». [En ligne]. [Http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/rapportsurleau/Etat-eau-ecosysteme-aquatique-qualite-eau-Quelle-situation_Rivieres-Fleuve.htm]. Page consultée le 27 mai 2016.

Mohammadi, K. (2012). *Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop* production. Resour Environ, 2(1), 80-85.

Mohanna, C., et Nys, Y. (1999). *Changes in zinc and manganese availability in broiler chicks induced by vegetal and microbial phytases.* Animal Feed Science and Technology, 77(3–4), 241–253. http://doi.org/10.1016/S0377-8401(98)00254-5

Moore, P. A., Daniel, T. C., et Edwards, D. R. (1999). *Reducing phosphorus runoff and improving poultry production with alum.* Poultry Science, 78(5), 692-698.

Moore, P. A., et Miller, D. M. (1994). *Decreasing phosphorus solubility in poultry litter with aluminum, calcium, and iron amendments.* Journal of Environmental Quality, 23(2), 325-330.

Moore, P., &et Miller, D. (1994). *Decreasing phosphorus solubility in poultry litter with aluminum, calcium, and iron amendments. Journal of Environmental Quality*. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/23/2/JEQ0230020325

Moore, P., et Miller, D. (1994*). Decreasing phosphorus solubility in poultry litter with aluminum, calcium, and iron amendments.* Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/23/2/JEQ0230020325

Mozaffari, M., et Sims, J. T. (1994). *Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture*. Soil Science, 157(2), 97-107.

Mutucumarana, R. K., Ravindran, V., Ravindran, G., et Cowieson, A. J. (2015). *Measurement of true ileal phosphorus digestibility in maize and soybean meal for broiler chickens*: Comparison of two methodologies. Animal Feed Science and Technology, 206. https://doi.org/10.1016/j.*anifeedsci.*2015.05.011

National Research Council. 1994. *Nutritional requirements of poultry*. 8th rev. ed. National Academy Press, Washington, DC

Nelson, T. S. (1967). *The utilization of phytate phosphorus by poultry*—A review. Poultry Science, 46(4), 862-871

Norris, D., Ngambi, J., et Mabelebele, M. (2014). *Genetic selection for docility: A review*. J. Anim. Plant …Retrieved from http://www.thejaps.org.pk/docs/v-24-2/03..pdf

NRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. SAUVANT D.,

NRC (Ed.). (1994). *Nutrient Requirements of Poultry* (9ieme Edit). The national academies press. http://doi.org/10.17226/2114

Ondreicka, R., J. K. et E. G. (1971). *Aluminum, its absorption, distribution and effects in phosphorus metabolism. In: S. C. Skoryna and D. Waldron-Edward (*Ed.) Intestinal Absorption of Metal Irons, Trace Elements, and Radionuclides. Oxford, 200, p 293. Pergamon Press.

Ondreicka, R., J. K. et E. G. (1971). *Aluminum, its absorption, distribution and effects in phosphorus metabolism. In: S. C. Skoryna and D.* Waldron-Edward (Ed.) Intestinal Absorption of Metal Irons, *Trace Elements, and Radionuclides*. Oxford, 200, p 293. Pergamon Press.

Ondreicka, R., Kortus, J., et Ginter, E. (1971). *Aluminum, its absorption, distribution, and effects on phosphorus metabolism.* Intestinal Absorption of Metal Ions, Trace Elements and Radionuclides. Oxford: Pergamon, 293-305.

Pellerin, S., et Nesme, T. (n.d.). *Flux de phosphore associés à l'élevage et conséquences sur la fertilité phosphatée des sols: analyse à plusieurs échelles*. Researchgate.net. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Nesme/publication/291456876_A_multiscale_analysis_of_livestock-

Rapport-Gratuit.com

produced_phosphorus_fluxes_and_their_consequences_for_soil_fertility/links/56d9681408aebabdb40f6fbc.pdf

PEREZ J.M., TRAN G. Coord., INRA Eds, Paris, 291 p.

Plumstead, P. W., Leytem, A. B., Maguire, R. O., Spears, J. W., Kwanyuen, P., et Brake, J. (2008*). Interaction of Calcium and Phytate in Broiler Diets. 1. Effects on Apparent Prececal Digestibility and Retention of Phosphorus*. Poultry Science, 87(3), 449–458. https://doi.org/10.3382/ps.2007-00231

Pointillart, A. (1994). *Phytates, phytases: leur importance dans l'alimentation des monogastriques*. INRA Productions animales, 7(1), 29-39.

Powers, W., et Angel, R. (2008*). A Review of the Capacity for Nutritional Strategies to Address Environmental Challenges in Poultry Production*. Poultry Science, 87(10), 1929–1938. http://doi.org/10.3382/ps.2008-00090

Qian, H., Kornegay, E. T., et Denbow, D. M. (1997). *Utilization of Phytate Phosphorus and Calcium as Influenced by Microbial Phytase, Cholecalciferol, and the Calcium: Total Phosphorus Ratio in Broiler Diets.* Poultry Science, 86(10), 1997–1938

Roberson, K., et EDWARDS, H. (1994*). Effects of 1, 25-dihydroxycholecalciferol and phytase on zinc utilization in broiler chicks*. Poultry Science. Retrieved from http://ps.oxfordjournals.org/content/73/8/1312.short

Rodehutscord, M. (2013). *Determination of phosphorus availability in poultry*. *World's Poultry Science* Journal, 69(3), 687–698. https://doi.org/10.1017/S0043933913000688

Rosa, I. V., Henry, P. R., et Ammerman, C. B. (1982*). Interrelationship of dietary phosphorus, aluminum and iron on performance and tissue mineral composition in lambs*. Journal of animal science, 55(5), 1231-1240.

Rousseau, X., Valable, A. S., Létourneau-Montminy, M. P., Même, N., Godet, E., Magnin, M., ... &et Narcy, A. (2016). *Adaptive response of broilers to dietary phosphorus and calcium restrictions*. Poultry science, 95(12), 2849-2860.

Rutherfurd, S. M., Chung, T. K., et Moughan, P. J. (2002). *The effect of microbial phytase on ileal phosphorus and amino acid digestibility in the broiler chicken.* British Poultry Science, 43(4), 598–606. http://doi.org/10.1080/0007166022000004516

Rutherfurd, S. M., Chung, T. K., Morel, P. C.,et Moughan, P. J. (2004). *Effect of Microbial Phytase on Ileal Digestibility of Phytate Phosphorus, Total Phosphorus, and Amino Acids in a Low-Phosphorus Diet for Broilers.* Poultry Science, 83(1), 61–68. http://doi.org/10.1093/ps/83.1.61

Sandberg, A. S., et Andlid, T. (2002). *Phytogenic and microbial phytases in human nutrition. International journal of food science &et technology*, 37(7), 823-833.

SAS Institute. 2004. SAS/STAT User's Guide. Release 9.1. SAS Inst. Inc., Cary, NC.

Sauveur, B. (1989). *Phosphore phytique et phytases dans l'alimentation des volailles*. INRA Productions animales, 2(5), 343–351.

Schindler, D. W. (1977). *Evolution of phosphorus limitation in lakes. Science*, 195(4275), 260-262.

Schröder, B., Breves, G., et Rodehutscord, M. (1996). *Mechanisms of intestinal phosphorus absorption and availability of dietary phosphorus in pigs.* DTW. Deutsche tierarztliche Wochenschrift, 103(6), 209-214.

Schrooyen, P. M., van der Meer, R., et De Kruif, C. G. (2001). *Microencapsulation: its application in nutrition.* Proceedings of the Nutrition Society, 60(4), 475-479.

Selle, P. H., et Ravindran, V. (2007). *Microbial phytase in poultry nutrition*. Animal Feed Science and Technology, 135(1), 1-41.

Selle, P. H., et Ravindran, V. (2007*). Microbial phytase in poultry nutrition. Animal Feed Science* and Technology, 135(1–2), 1–41. http://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.010

Selle, P. H., et Ravindran, V. (2007*). Microbial phytase in poultry nutrition*. *Animal Feed Science and Technology*, 135(1–2), 1–41. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.010

Shafey, T. M., McDonald, M. W., et Dingle, J. G. (1991). *Effects of dietary calcium and available phosphorus concentration on digesta pH and on the availability of calcium, iron, magnesium and zinc from the intestinal contents of meat chickens.* British Poultry Science, 32(1), 185–194. https://doi.org/10.1080/00071669108417339

Sharpley, A et Moyer, B. (2000). *Phosphorus forms in manure and compostand their release during similated rainfal*l. Journal of Environmental Quality, 29, 1462–1469.

Sharpley, A. (1999). *Symposium: Reducing the environmental impact of poultry production: Focus on phosphorus: Agricultural phosphorus, water quality, and poultry production: Are they compatible*? Poultry Science, 78(5), 660–673. Retrieved from http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033126390&etpartnerID=40&etmd5=e341c303c4d35456d2ba9716bea41bbf

Sharpley, A. N., et Smith, S. J. (1985). *Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soil*s. Soil Science Society of America Journal, 49(1), 127-130.

Sharpley, A., et Meyer, M. (1994). Minimizing Agricultural Nonpoint-Source Impacts: A Symposium Overview. Journal of Environmental Quality, 23(1), 1–2.

Shires, A., Thompson, J. R., Turner, B. V., Kennedy, P. M., et Goh, Y. K. (1987*). Rate of passage of corn-canola meal and corn-soybean meal diets through the gastrointestinal tract of broiler and White Leghorn chickens*. Poultry Science 66, 289-98.

Shreve, B., et Moore, P. (1995*). Reduction of phosphorus in runoff from field-applied poultry litter using chemical amendments*. Journal of Environmental Quality. Retrieved from https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/24/1/JEQ0240010106

Sims, J. T., et Luka-McCafferty, N. J. (2002). On-farm evaluation of aluminum sulfate (alum) as a poultry litter amendment. Journal of Environmental Quality, 31(6), 2066-2073.

Smith, D. R., Moore, P. A., Miles, D. M., Haggard, B. E., et Daniel, T. C. (2004*). Decreasing phosphorus runoff losses from land-applied poultry litter with dietary modifications and alum addition*. Journal of environmental quality, 33(6), 2210-2216.

Smith, D., et Moore, P. (2001). *Effects of alum and aluminum chloride on phosphorus runoff from swine manure*. Journal Environnemental Quality, Journal of …, 992–998. https://doi.org/10.2134/jeq2001.303992x

Standish, J. F., Ammerman, C. B., Palmer, A. Z., et Simpson, C. F. (1971*). Influence of dietary iron and phosphorus on performance, tissue mineral composition and mineral absorption in steers*. Journal of animal science, 33(1), 171-178.

Statistiques Canada (2016). Agriculture et Agroalimentaire Canada. « *L'industrie du poulet en un clin d'œi*l. ». [En ligne]. [Http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/statistiques-et-information-sur-

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

les-marches/par-produit-secteur/volaille-et-oeufs/information-sur-le-marche-de-la-volaille-et-des-oeufs-industrie-canadienne/poulet/?id=1384971854392. Page consulté le 19 février 2017].

Suttle, N. (2010). Mineral nutrition of livestock. https://doi.org/10.1079/9781845934729.0000

Tasistro, A. S., Cabrera, M. L., et Kissel, D. E. (2004*). Water soluble phosphorus released by poultry litter*: Effect of extraction and time after application. Nutrient cycling in agroecosystems, 68(3), 223-234.

Toor, G. S., Peak, J. D., et Sims, J. T. (2005). *Phosphorus Speciation in Broiler Litter and Turkey Manure Produced from Modified Diets.* Journal Environnemental Quality, 697(July 2004), 687–697.

Trans, G., &et Skiba, F. (2005). *Variabilité inter et intra matière première de la teneur en phosphore total et phytique et de l'activité phytasique*. Productions Animales-Paris-Institut National De La Recherche Agronomique-, 18(3), 159.

Tsay, J., Yang, Z., Ross, F. P., Cunningham-Rundles, S., Lin, H., Coleman, R.,et Vogiatzi, M. G. (2010*). Bone loss caused by iron overload in a murine model: importance of oxidative stress*. Blood, *116(14), 2582–2589.* https://doi.org/10.1182/blood-2009-12-260083

Tyler, C. (1946). *Studies in the absorption and excretion of certain minerals by poultry*. Journal Agricultural Science 36, 275-282.

UPA, 2000. *Portrait agro-environnement des fermes du Québec*

Vadas, P. a, Meisinger, J. J., Sikora, L. J., McMurtry, J. P., et Sefton, E. (2004). Effect of poultry diet on phosphorus in runoff from soils amended with poultry manure and compost. Journal of Environmental Quality, 33(5), 1845–54. http://doi.org/10.2134/jeq2004.1845

Vadas, P. A., et Kleinman, P. J. A. (2006). *Effect of methodology in estimating and interpreting water-extractable phosphorus in animal manures*. Journal of Environmental Quality, 35(4), 1151–1159. https://doi.org/10.2134/jeq2005.0332

Vahl, H. A., et& van 'T Klooster, A. T. (1987*). Dietary iron and broiler performance*. British Poultry Science, 28(4), 567–76. https://doi.org/10.1080/00071668708416992

Van der Klis, J. D., Versteegh, H. A., Simons, P. C., et Kies, A. K. (1997). *The efficacy of phytase in corn-soybean meal-based diets for laying hens.* Poultry Science, 76(11), 1535-1542.

Van der Klis, J. D., Verstegen, M. W. A., et De Wit, W. (1990). *Absorption of minerals and retention time of dry matter in the gastrointestinal tract of broilers*. Poultry Science, 69(12), 2185-2194.

Waldroup, P. (1999). *Nutritional approaches to reducing phosphorus excretion by poultry*. Poultry Science*,* 78(5), 683–691. https://doi.org/10.1093/ps/78.5.683

Waldroup, P. W. (1999a*). Nutritional approaches to reducing phosphorus excretion by poultry*. Poultry Science, 78(5), 683–691. http://doi.org/10.1093/ps/78.5.683

Warren, J. G., Keahey, D., Penn, C. J., Phillips, S. B., et Mullins, G. L. (2006). *Environmental and production consequences of using alum-amended poultry litter as a nutrient source for corn*. Journal of Environmental Quality, 35(1), 172–182. http://doi.org/10.2134/jeq2004.0418

Warren, J. G., Penn, C. J., McGrath, J. M., et Sistani, K. (2008). *The impact of alum addition on organic P transformations in poultry litter and litter-amended soil*. Journal of Environmental Quality, 37(2), 469–76. http://doi.org/10.2134/jeq2007.0239

Wasserman, R. H., et Taylor, A. N. (1973*). Intestinal absorption of phosphate in the chick: effect of vitamin D3 and other parameters*. The Journal of nutrition, 103(4), 586-599.

Wasserman, R. H., et Taylor, A. N. (1973*). Intestinal absorption of phosphate in the chick: effect of vitamin D3 and other parameters*. The Journal of nutrition, 103(4), 586-599.

Weiss, W. P., &et Faulkner, M. J. (2015*). Practical Recommendations for Trace Minerals for Lactating Dairy Cows*, 47–63.

Whitehead, M. W., Farrar, G., Christie, G. L., Blair, J. A., Thompson, R. P., &et Powell, J. J. (1997). *Mechanisms of aluminum absorption in rats*. The American journal of clinical nutrition, 65(5), 1446-1452.

Yan, F., et Waldroup, P. W. (2006). *Nonphytate phosphorus requirement and phosphorus excretion of broiler chicks fed diets composed of normal or high available phosphate corn as influenced by phytase supplementation and vitamin D source.* International Journal of Poultry Science, 5(3), 219–228. http://doi.org/10.3923/ijps.2006.219.228

Zhao, Y. Q., Zhao, X. H., et Babatunde, A. O. (2009). *Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: long-term trial*. Bioresource technology, 100(2), 644-648.

Zimmermann, M. B., et Windhab, E. J. (2010). *Encapsulation of iron and other micronutrients for food fortification*. In Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing (pp. 187-209). Springer New York.

Zotti, A., Rizzi, C., Chiericato, G., et Bernardini, D. (2003). *Accuracy and precision of dual-energy X-ray absorptiometry for ex vivo determination of mineral content in Turkey poult bones*. Veterinary Radiology and Ultrasound, 44(1), 49–52. https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2003.tb01448.x

Annexe 1: Affiche scientifique présenté au congrès Poultry science en juillet 2017 à Orlando Floride

Decreasing water soluble phosphorus excreted via micro-encapsulation of iron sulfate and alum added in the diet of broilers

Floradin Piterson[1], Guay Frédéric[1], Létourneau-Montminy Marie-Pierre[1]

[1]Animal Science, Laval University, Québec city, QC-G1V 0A6, Canada

Marie-Pierre.Letourneau@fsaa.ulaval.ca

UNIVERSITÉ LAVAL

Introduction

- Runoff and soil erosion can carry excess phosphorus (P), especially Water-Soluble Phosphorus (WSP) applied to land into natural waterways causing eutrophication (Moore et al., 1999).
- Phosphates are commonly removed from municipal and industrial wastewater by precipitation with multivalent metals, such as Fe^{3+} and Al^{3+} (Metcalf et Eddy, 2003).
- Considering the high cost of this practice if apply on manure, diet supplementation with these cations could be a good alternative to decrease excreta WSP.
- High levels of iron (Fe) and alumimium (Al) in poultry diet decrease P digestibility and broiler performances by forming insoluble complexes associated with reduce phytate solubility (Deobald and Elvehjem 1935).
- Microencapsulation is a process in which active ingredients surrounded by a lipid matrix to protect and release them in targeted portions of the gastrointestinal tract (Madene et al., 2006).

Objective

- Evaluate the impact of iron sulfate and alum micro encapsulated added in broiler diet on water-soluble P (WSP) excretion, and P and calcium (Ca) retention.

● Target zone for optimal release Fe^{3+} and Al^{3+} and formation insoluble complexes.

Materials and methods

- 10 Corn-SBM based diets were formulated (phytase and antibiotics free)
  - Positive control (PC), 0.94% Ca and 0.51 % (non- phytate P) NPP
  - Negative control (NC), 0.46 % Ca and 0.32 % NPP
  - NC + 4 levels of iron sulfate (16, 26 ,36, and 46 ppm Fe) micro-encapsulated determined from (Fe or Al/P ratio, 1:6; 1:10, 1:14, 1:18)
  - NC + 4 levels of alum (7, 12, 17, 22 ppm Al) micro-encapsulated determined from (Fe or Al/P ratio, 1:6; 1:10, 1:14, 1:18)
- 360 mâles Cobb 500, 6 birds per cage, excreta collected d 24 to 28.
- Data were analyzed as a randomized complete block design by PROC MIXED of SAS using a polynomial Contrast (PC vs NC; Fe lin, quad, cub; Al lin, quad, cub).

Results and discussion

- Diets did not affect significantly growth performance except a reduction of ADG (6%, P = 0.04) in NC compared to PC due to lower dietary NPP and Ca.
- P and Ca ingested, retained, and excreted as well as retention efficiency were not modified by the addition of iron sulfate or alum, while PC diet ingested, retained and excreted more P and Ca then NC diet (P<0.001) with similar efficiency (Fig. 1).

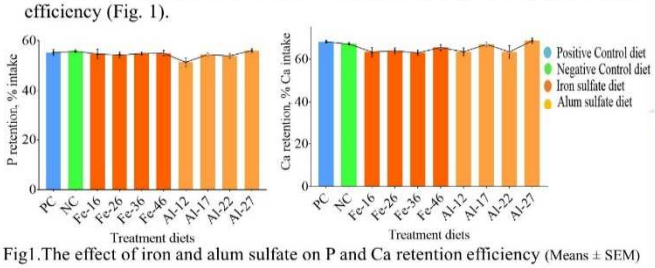


Fig1.The effect of iron and alum sulfate on P and Ca retention efficiency (Means ± SEM)

- Iron sulfate addition showed a linear (P<0.01) and quadratic (P<0.01) response on the WSP excretion indicating that 26 ppm resulted in the maximum WSP reduction.
- Alum supplemented also showed linear (P=0.001) and quadratic effect (P=0.014) with WSP decreases of 15, 15, 19 and 16% with the increase of the dose compared to NC.

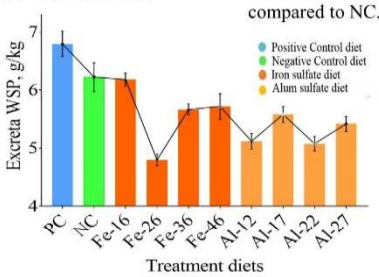


Fig2.The effect of iron and alum sulfate on excreta water-soluble phosphorus

Conclusion and perspectives

- Incorporation of iron and alum sulfate micro-encapsulated in the diet decrease excreta WSP without modifying broiler performance and P & Ca retention, indicating that P is insolubilized after the main absorption sites.
- This strategy may be a promising alternative to reduce eutrophication
- Next step will be to validate that WSP is also decrease in litter

References

- Daniel. And D.R. Edwards (1999) Poult. Sci., 78:692-698; Deobald, H. J., and Elvehjem, C. A. (1935). *Amer. J. Physiol.*, 111:118-123; Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., and Desobry, S. (2006). *Intern. J. Food Sci. Techn.*,. 41:1-21; McGRaw. Metcalf, E. E., and Eddy, H. P. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. New York; Moore, P.A., T.C

Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec

CRSAD

Annexe 2: Affiche scientifique présenté en novembre 2017 au congrès étudiant CRIBIQ au tour du thème « les procédés verts pour la bioéconomie de demain».

Réduction de l'excrétion de phosphore soluble dans l'eau par l'encapsulation de sulfate de fer et d'aluminium chez le poulet afin de diminuer les risques d'eutrophisation associés à cette production

Floradin Piterson[1], Guay Frédéric[1], Létourneau-Montminy Marie-Pierre[1]

[1]Département des Sciences Animales, Université Laval, Québec, QC-G1V 0A6, Canada /Piterson.floradin.1@ulaval.ca

UNIVERSITÉ LAVAL

COLLOQUE ÉTUDIANT 2017

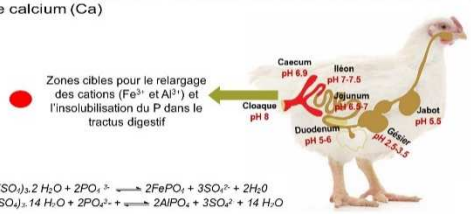
CRIBIQ

Introduction

- Les cyanobactéries ou algues bleues vertes, responsables de l'eutrophisation des cours d'eau, demeurent problématiques au Québec.
- Leur développement est accentué par le lessivage et le ruissellement du phosphore (P) épandu sous forme soluble dans les fumiers (Daniel et Edwards,1999).
- Des sels métalliques, notamment les sulfates de fer et d'aluminium, sont courrament utilisés pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles (Metcalf et Eddy, 2003).
- Compte tenu de la teneur élevée en P des fumiers en raison d'une faible rétention du P des grains, la supplémentation de sels métalliques pour insolubiliser le P non absorbé dans le tube digestif pourrait être intéressante.
- Le fer (Fe) et l'aluminium (Al) sont toxiques à des fortes concentrations dans l'alimentation des poulets et réduisent la digestibilité du P et les performances (Deobald et Elvehjem, 1935).
- Des méthodes d'encapsulation, consistant à protéger par enrobage des substances actives, permettent de réguler la libération de ces substances dans les portions ciblées du tube digestif (Madene et al., 2006).

Objectifs

- Évaluer le potentiel du sulfate de fer et d'aluminium (Alum) micro-encapsulés à insolubiliser le P in vitro sur des digesta de poulets
- Évaluer l'effet de l'ajout de sulfate ferreux ($Fe_2(SO_4)_3$) et d'alum ($Al_2(SO_4)_3$) micro-encapsulés dans l'alimentation des poulets de chair sur l'excrétion de P soluble des excréta et la rétention de P et de calcium (Ca)



$Fe_2(SO_4)_3.2\,H_2O + 2PO_4^{3-} \rightleftharpoons 2FePO_4 + 3SO_4^{2-} + 2H_2O$

$Al_2(SO_4)_3.14\,H_2O + 2PO_4^{3-} + \rightleftharpoons 2AlPO_4 + 3SO_4^{2-} + 14\,H_2O$

Méthodes

Essai préliminaire in vitro

- Des digesta d'iléon et de ceaca ont été prelevé sur 50 poulets.
- Des composés de $Fe_2(SO_4)_3$ et $Al_2(SO_4)_3$ ont été ajoutés dans les digesta, à un temps de transit correspondant à ce qui est attendu in vivo et différents ratios P:Fe et P:Al ont été testés.

Essai principal

10 traitements alimentaires de composition classique

- Un témoin positif (C+) (0.94% de Ca et 0.51 % P disponible).
- Un témoin négatif (C-) (0.46% Ca et 0.32% P disponible).
- C- additionné de

  16, 26, 36 et 46 ppm de Fe (Fe:P, 1:6; 1:10, 1:14, 1:18) micro-encapsulé
- C- additionné de

  7, 12, 17, 22 ppm d'Al (Al:P, 1:6; 1:10, 1:14, 1:18)

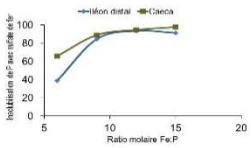
  micro-encapsulé

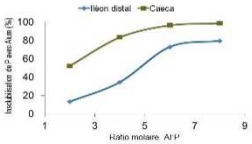
- 6 poulets mâles de 14 jours ont été assignés à 1 des 10 régimes alimentaires et placés en cage de 6 pour un total de 6 cages par traitement.
- Les données ont été analysées en blocs aléatoires complets avec la PROC MIXED de SAS (contraste polynomiaux; C+ vs C-; Fe lin, quad, cub; Al lin, quad, cub).

Résultats

Essai préliminaire

Les résultats de l'essai in vitro montrent que le sulfate de fer et l'alum sont capables d'insolubiliser plus de 90% du P

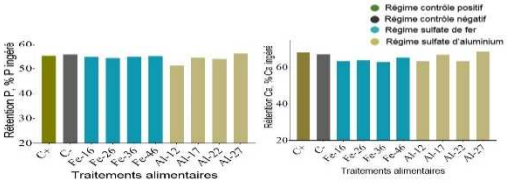


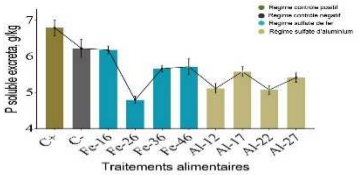


Résultats (suite)

Essai principal

- Les résultats montrent que les performances ne sont pas modifiées par les ingrédients actifs.
- L'ingestion, l'excrétion ainsi que la rétention de P et Ca n'étaient pas modifiées par les ingrédients actifs.





- Les effets du Fe sur l'excrétion du P soluble montre un effet linéaire (P<0.01) et quadratique (P<0.01) montrant que la dose 2 conduit à une diminution maximale de la solubilité du P (-23% par rapport C-.
- Pour l'aluminium l'effet était également linéaire (P=0.001) et quadratique (P=0.014) avec des diminutions de 18, 10, 18 et 13% avec l'augmentation de la dose par rapport à C-.

Conclusions

- L'addition de sulfate de fer ou d'alum a diminué l'excrétion de P soluble par les oiseaux comme prévu et ceci sans modifier leurs performances. Cette stratégie peut être une alternative prometteuse pour réduire l'eutrophisation.
- Les fientes étant accumulées dans un milieu complexe qu'est la litière en conditions commerciales, un défi de taille demeure, le maintien du P sous forme insoluble dans les litières

References

Daniel. And D.R. Edwards (1999) Poult. Sci., 78:692-698; Deobald, H. J., and Elvehjem, C. A. (1935). *Amer. J. Physiol.*, 111:118-123; Madene, A., Jacquot, M., Scher, J., and Desobry, S. (2006). *Intorn. J. Food Sci. Techn.*., 41:1-21; McGRaw. Metcalf, E. E., and Eddy, H. P. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. New York; Moore, P.A., T.C

Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec

CRSAD