



UNIVERSITÉ
LAVAL



Centre de développement
du porc du Québec inc.

Validation de la méthode du bilan alimentaire pour estimer la production de phosphore d'un lieu d'élevage de poulettes ou de production d'œufs de consommation

-

Rapport scientifique

Janvier 2019

Marie-Pierre Létourneau Montminy, Ph. D.,
Université Laval

Manel Hamdi, Ph. D., Université Laval

Laetitia Cloutier, M. Sc., agr., CDPQ

Patrick Gagnon, Ph. D., CDPQ

Collaboration :

Frédéric Guay, Ph. D., Université Laval

Rachel Chiasson, Université Laval

Isabelle Lachance, M. Sc., Université Laval

Équipe de réalisation

Organisme demandeur :	Le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
Responsable du projet :	Joanne Lagacé, Chargée de projet, CRAAQ
Responsables scientifiques :	Marie-Pierre Létourneau Montminy, Ph.D. Professeure, Université Laval Laetitia Cloutier, M.Sc., Responsable – Alimentation et nutrition, CDPQ Frédéric Guay, Ph.D Professeur, Université Laval
Équipes de réalisation :	Manel Hamdi, Ph.D., Chercheur postdoctoral, Université Laval Isabelle Lachance, M.Sc., Professionnelle de recherche, Université Laval Rachel Chiasson, étudiante 1 ^e cycle, Université Laval

Remerciement aux partenaires financiers

Ce projet a été réalisé en vertu du sous-volet 3.2 du programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ).

Québec 

La Fédération des producteurs d'œufs du Québec a aussi contribué financièrement au projet.

PARTENAIRES DU PROJET



Merci également aux entreprises suivantes pour leur contribution en nature :
La Coop fédérée, Trouw Nutrition Canada (Nutreco), Avimix Nutrition, Nutri-Expert

Résumé

Au Québec, les entreprises agricoles doivent avoir un bilan de phosphore équilibré c'est-à-dire que leurs sols doivent avoir la capacité de supporter les quantités à épandre de phosphore produit par leur élevage. Le bilan alimentaire serait une méthode fiable pour estimer la production de P d'une exploitation animale, celle-ci impliquant simplement de faire la différence entre les quantités de phosphore servies des quantités de phosphore retenues par l'exploitation.

L'objectif de ce projet était de valider la méthode du bilan alimentaire pour estimer les rejets en phosphore des élevages de poulettes et de poules pondeuses. Plus spécifiquement, les objectifs étaient, entre autres, de valider les facteurs de rétentions des poules et des œufs, d'estimer l'erreur de la méthode et d'établir des critères de validation permettant aux utilisateurs de valider les rejets estimés par le biais de ce calcul.

Un total de 11 fermes différentes de poulettes a été suivie pendant 19 semaines, et 13 fermes de poules pondeuses ont été suivies de 19 semaines d'âge jusqu'à la fin de la période de ponte. Le gain de poids corporel et la prise alimentaire ont été suivis pendant toute l'expérience et 5 oiseaux par ferme ont été abattus, plumés, radiographiés puis broyés pour être analysés en laboratoire à 0, 10 et 19 semaines d'âge pour les poulettes et à 19, 31, 43, 55, 67 semaines d'âge pour les poules pondeuses. Des œufs ont également été collectés au début, au milieu et à la fin du cycle de ponte pour analyser différentes caractéristiques physico-chimiques.

Les poulettes et les poules pondeuses ont reçu des régimes contenant respectivement 5,3 à 8,4 g et 4,7 à 7,1 g de P / kg d'aliment et, en moyenne, les poulettes ont pris 1,15 kg de poids pendant les 19 semaines contre 300 g pour les poules pondeuses de 19 à 67 semaines, soit 60 et 6 g/semaine.

Les conclusions découlant de ce projet sont les suivantes :

Chez les élevages de poulettes :

- Le facteur de rétention de la poulette est de 6,6 g P/kg de gain.
- Le critère le plus sensible de ce type d'élevage est la teneur en P des aliments, donc ces valeurs doivent être basées sur des analyses de laboratoire;
- L'incertitude de la méthode a été établie à 15 %.
- Le coefficient de rétention, critère de validation des rejets estimés, est de 30 %.

Chez les productions d'œufs de consommation :

- Le facteur de rétention des poules pondeuses est de 4 g P/kg de gain.
- Le facteur de rétention des œufs est de 1,8 g P/kg œufs.
- Le critère le plus sensible de ce type d'élevage est la teneur en P des aliments, donc ces valeurs doivent être basées sur des analyses de laboratoire;
- L'incertitude de la méthode a été établie à 13,5 %.
- Le coefficient de rétention, critère de validation des rejets estimés, est de 25 %.

En conclusion, le bilan alimentaire est une méthode fiable pour établir la production de phosphore d'un lieu d'élevage avicole. Les facteurs de rétention étant maintenant validés, il est impératif de bien établir la teneur en phosphore des aliments pour assurer une valeur de rejets en phosphore la plus exacte possible.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Mise en contexte	1
3. Objectifs	2
4. Méthodologie	3
4.1 Aliments	3
4.2 Poulettes et poules	3
4.3 Œufs	5
4.4 Analyses statistiques	6
5. Résultats	7
5.1 Évaluer la rétention de P chez poulette, pondeuse et œufs	7
5.2 Utilisation de la technologie DXA pour prédire et revalider les coefficients de rétention de P établis	10
5.3 Utilisation de la technologie DXA pour prédire et revalider les coefficients de rétention de P établis dans les œufs et comme mesure de qualité de la coquille	12
5.4 Exercices de réalisation des bilans alimentaires	13
5.5 Analyse de sensibilité	16
5.6 Calcul de l'incertitude sur l'estimation du phosphore excrété	21
5.7 Coefficient de rétention maximal	25
6. Conclusion	27
7. Références	28

Liste des tableaux

Tableau 1 - Relation entre le P corporel estimé par broyage des carcasses et le CMO obtenu par DXA	11
Tableau 2 - Écart-type des paramètres du calcul du bilan alimentaire pour un élevage de poulettes	17
Tableau 3 - Écart-type des paramètres du calcul du bilan alimentaire pour une production d'œufs de consommation.....	18
Tableau 4 - Résultats de l'analyse de sensibilité pour un élevage de poulettes.....	20
Tableau 5 - Résultats de l'analyse de sensibilité pour une production d'œufs de consommation	20
Tableau 6 - Variables d'entrée nécessaires pour le calcul du phosphore excrété en élevage de poulettes.	22
Tableau 7 - Calcul du phosphore excrété et de son incertitude pour un lot de poulettes.	22
Tableau 8 - Exemple de calcul du phosphore excrété pour un lot de poulettes basé sur les valeurs d'entrée du Tableau 2.	23
Tableau 9 - Variables d'entrée nécessaires pour le calcul du phosphore excrété en élevage de pondeuses.	24
Tableau 10 - Calcul du phosphore excrété annuel et de son incertitude pour un lot de pondeuses.	24
Tableau 11 - Exemple de calcul du phosphore excrété un lot de pondeuses basé sur les valeurs d'entrée du Tableau 10	25
Tableau 12 - Pourcentage de rétention maximale par catégorie d'élevage	26

Liste des figures

Figure 1 - Absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA, Hologic®).....	3
Figure 2 - Exemple de rapport de scan des poulettes	4
Figure 3 - Étapes de broyage des poulettes et des poules	4
Figure 4 - Congélation des échantillons broyés.....	5
Figure 5 - Détermination des caractéristiques des œufs	5
Figure 6 - Exemple de rapport de scan d'œuf obtenu par l'absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA, Hologic®).....	6
Figure 7 - Mesure de la force à la rupture d'un œuf	6
Figure 8 - Teneur en P corporel en fonction du poids des poulettes pour chacune des fermes ..	7
Figure 9 - Poids moyen en fonction du numéro de livraison des poules pour chacune des souches (blanche (1) et brune (2))	8
Figure 10 - Teneur en P corporel en fonction de l'âge (en semaine) des poules pour chacune des fermes.....	8
Figure 11 - Teneur en P corporel en fonction du poids des poules pour chacune des fermes	9
Figure 12 - Teneur en P des œufs g/Kg d'œuf frais en fonction du numéro de livraison pour chacune des fermes.....	10
Figure 13 - Teneur en P corporel en fonction du contenu minéral osseux des poulettes pour chacune des fermes.....	11
Figure 14 - Teneur en P corporel en fonction du contenu minéral osseux des poules pondeuses pour chacune des fermes.....	12
Figure 15 - Contenu minéral osseux en fonction du poids de la coquille sèche pour chacune des fermes.....	12
Figure 16 - Contenu minéral osseux en fonction du contenu en Ca de la coquille en fonction de la ferme.....	13
Figure 17 - Proportion du phosphore servi qui est retenu pour un élevage type de poulettes.....	15
Figure 18 - Proportion du phosphore servi qui est retenu pour une production type d'œufs	15

1. Introduction

Depuis 2010, selon le Règlement sur les exploitations agricoles (REA), les entreprises agricoles doivent avoir un bilan de phosphore équilibré, c'est-à-dire que leurs sols doivent avoir la capacité de supporter les quantités de phosphore à épandre résultant de leur troupeau et des autres matières fertilisantes. Pour évaluer les rejets en phosphore de leur exploitation, les producteurs ont deux moyens : la caractérisation des effluents d'élevage ou l'utilisation de valeurs de référence (Annexe VI du REA). Dans le premier cas, le travail requis pour caractériser les effluents d'élevage est exigeant et demande beaucoup de temps. En effet, plusieurs prélèvements de fumier doivent être pris pour constituer un échantillon. De plus, ces prélèvements doivent être représentatifs, ce qui implique par exemple de brasser la fosse dans le cas de fumier liquide. Pour ce qui est des valeurs de référence du REA, ces dernières sont des quantités de rejet par type d'animal, mais qui ont été majorées de 20 % afin de s'assurer de ne pas sous-estimer les rejets en phosphore (Annexe VI du REA). Or, dans le cas de certaines entreprises où la capacité de support des sols convient tout juste à la quantité de matières fertilisantes à épandre, surestimer les rejets pourrait faire basculer le bilan de phosphore en un bilan positif et ainsi obliger l'exploitant à acquérir ou à louer des terres pour épandre le surplus de phosphore ou encore devoir signer une entente d'épandage avec d'autres exploitants agricoles. De plus, les efforts des producteurs, plus performants et efficaces pour réduire leurs rejets en phosphore, ne seront pas mis en valeur avec ces valeurs de référence puisque ces dernières sont basées sur des performances moyennes.

Bien que seuls ces deux moyens soient actuellement autorisés au Québec, une autre méthode existe soit celle du bilan alimentaire et elle est en voie d'être autorisée dans le cadre du REA. Cette méthode permet de déterminer les rejets en effectuant la différence entre les quantités de phosphore entrées et celles sorties de l'exploitation. Les quantités de phosphore entrées sur le lieu d'élevage correspondent à celles que l'on retrouve dans les aliments et les animaux achetés. Les quantités de phosphore sorties correspondent à celles retenues par les animaux incluant les animaux vendus ou morts au cours de la période d'évaluation. Le bilan alimentaire a ainsi l'avantage d'être une méthode plus simple d'utilisation et moins coûteuse que la caractérisation, tout en évaluant avec précision les rejets et, généralement, plus justement qu'en utilisant des valeurs de référence. De plus, le bilan alimentaire peut servir d'indicateur de performance des animaux et être utilisé comme outil de diagnostic pour réduire les rejets en phosphore. Ces avantages favorisent ainsi la compétitivité et la pérennité des entreprises agricoles.

Pour atteindre les objectifs de ce projet qui sont d'offrir une méthode alternative plus simple et plus performante aux éleveurs québécois afin d'estimer la charge de phosphore de leur lieu d'élevage, l'ensemble des recommandations du Comité de coordination des effluents d'élevage (CCEE) doit être accompli dont la validation des équations du bilan alimentaire avant de permettre leur utilisation dans le cadre du REA.

2. Mise en contexte

La méthode du bilan alimentaire pourrait ne pas être appropriée pour le phosphore lorsque ce nutriment ainsi que le calcium, ce dernier influençant l'absorption du phosphore, ne sont pas fournis en quantité suffisante dans l'alimentation pour permettre d'atteindre le niveau de minéralisation maximal utilisé pour le calcul du bilan. Il n'existe cependant pas de valeur de rétention de P pour les poules, les valeurs des poulets de chair étant la référence (ITAVI, 2013) et prenant une valeur de 4,8 à 5,8 g/kg de GMQ.

Il faut noter que très peu d'études ont été réalisées sur les apports phosphocalciques chez la poulette.

De plus, cette méthode suppose que la rétention de phosphore est constante par unité de gain de poids corporel, ce qui n'est pas toujours le cas (Rousseau et al., 2012). En effet, le taux de minéralisation et le phosphore retenu par kilogramme de gain de poids peuvent varier significativement selon le niveau d'apport en phosphore et de calcium des aliments (Faridi et al., 2015; Létourneau-Montminy et al., 2010). Cette valeur de rétention demeure ainsi valide lorsque les apports de phosphore digestibles sont déterminés selon les recommandations uniquement. Notons que présentement, il est fort possible que les poulettes et poules reçoivent suffisamment de minéraux pour maximiser la minéralisation de leurs os considérant que les besoins n'ont été établis que par les compagnies de génétique et qu'ils incluent de large marge de sécurité. De plus, compte tenu du contexte variable des apports alimentaires en phosphore digestible (ex. : phosphates, phytase, drêches, farine de viande), il est crucial de développer une méthode simple et robuste permettant de mesurer la minéralisation osseuse des poulettes et poules abattus au Québec afin de vérifier la validité de la méthode du bilan alimentaire pour estimer la charge de phosphore des fumiers de poules. Cette approche se base sur un projet similaire réalisé chez le porc.

Les méthodes traditionnelles d'évaluation de la croissance et de la minéralisation osseuse chez les volailles requièrent l'abattage, la dissection, la prise de mesures sur des os spécifiques de la carcasse (ex. : longueur, circonférence, volume, poids, résistance à la rupture, etc.), la détermination des cendres totales ainsi que du contenu minéral de ces mêmes os ou du squelette dans son ensemble. Ces méthodes sont très coûteuses, demandent beaucoup de travail de dissection et de laboratoire et elles sont assujetties aux biais de l'opérateur. De plus, comme toutes les techniques d'abattage, cette méthode ne permet pas de faire un suivi sur un même animal. L'absorptiométrie aux rayons X à deux niveaux d'énergie (DXA) a été proposée avec succès pour estimer le contenu minéral osseux (CMO) et la densité minérale osseuse (DMO) chez l'homme et chez les animaux domestiques en raison de sa précision, sa rapidité, les bas niveaux de radiation et de sa calibration stable. Cette technologie est utilisée par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) depuis 1995 pour déterminer la composition corporelle et minérale des porcs et des agneaux et depuis 2017 par l'équipe du Dr Létourneau-Montminy pour le poulet et le poisson et la méthode sera validée pour la poulette, la poule et les œufs dans le présent projet.

3. Objectifs

L'objectif principal de ce travail était de valider la méthode du bilan alimentaire pour estimer les rejets en phosphore chez la poulette et la poule pondeuse. Plus spécifiquement, les objectifs étaient :

1. Évaluer le facteur de retenu en phosphore chez la poulette, la pondeuse et les œufs;
2. Utiliser la technologie DXA pour prédire et revalider les coefficients de rétention de P établis
3. Utiliser la technologie DXA pour prédire et revalider les coefficients de rétention de P établis dans les œufs et comme mesure de qualité de la coquille
4. Évaluer la précision de la méthode de bilan alimentaire par une analyse de sensibilité et un calcul d'incertitude;
5. Établir un critère de validation des résultats du calcul du bilan alimentaire.

4. Méthodologie

4.1 Aliments

Plusieurs échantillons d'aliments ont été fournis par les différentes fermes, chaque fois qu'il y a eu un changement de la formule de l'aliment ou la réception de nouveau lot de moulée. La teneur en Ca et P a été analysée pour chaque aliment au laboratoire de l'IRDA.

Les fermes devaient également fournir des informations en ce qui concerne la composition en ingrédients des différents aliments, les formules théoriques et les quantités de chaque aliment livré à la ferme, mais pour quelques fermes il nous manquait des informations sur les quantités d'aliments consommés pour chaque livraison qui n'ont pas permis de compléter leur bilan alimentaire.

4.2 Poulettes et poules

Le présent projet consistait à déterminer les compositions corporelles des poulettes, des poules pondeuses ainsi que la composition des œufs pour déterminer leur coefficient respectif de phosphore retenu. Ces données ont été utilisées pour valider les valeurs approximatives de phosphore retenu proposées actuellement et ainsi s'assurer de la validité du bilan alimentaire pour établir la production de phosphore.

Un total de 11 éleveurs de poulettes ont fourni les données nécessaires au calcul de leur bilan alimentaire. Cela consistait, pour chaque élevage, de fournir 5 poulettes au début (semaine 1), au milieu (10^{ème} semaine), et à la fin (19^{ème} semaine) de la phase de croissance ainsi que des échantillons de la moulée pour chaque période. Pour la partie ponte, 13 fermes de poules pondeuses ont fournis des poules à différents moments de l'élevage (19; 32; 45; 58 et 71 semaine d'âge), des œufs (3 douzaines d'œufs de 3 tailles différentes) au début, au milieu et à la fin du cycle ainsi que des échantillons d'aliments pour chaque phase d'alimentation.

Les poulettes et les poules ont été livrées vivantes au Centre de recherche en sciences animales Deschambault (CRSAD), où elles ont été abattues, déplumées et congelées sans éviscération. Après avoir réalisé le calibrage de l'appareil (Discovery W; Hologic Inc., Waltham, MA, USA) et fait le choix du mode adéquat de scan selon l'âge et le poids des animaux, les poulettes et les poules ont été radiographiées (Figure 1).



Figure 1 - Absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA, Hologic®)

Les oiseaux ont été positionnés toujours de la même façon pour ne pas induire de biais dans l'estimation de la DMO qui est calculée à partir du volume. L'appareil possède une grande précision, il n'y a donc pas besoin de faire plusieurs répétitions. Le rapport de scan obtenu nous permet d'avoir le poids total estimé (La différence de poids entre celui mesuré et l'estimé est autour de 2 à 3 %), le contenu minéral osseux (BMC, g), la densité minérale osseuse (BMD, g/cm²), la masse grasse (Fat Mass, g) et la masse maigre (Lean, g) (Figure 2).

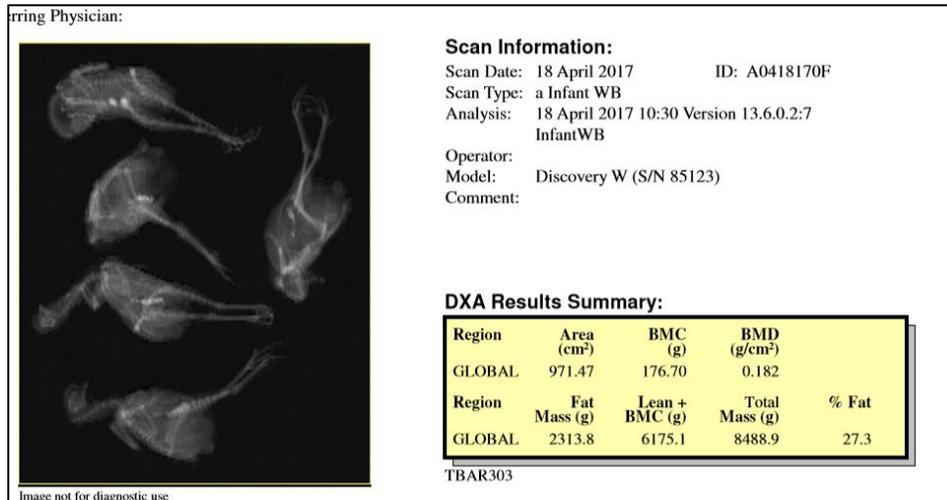


Figure 2 - Exemple de rapport de scan des poulettes

Les carcasses ont ensuite été découpées et congelées en tranches d'environ 5 cm avec une scie électrique avant d'être mises ensemble (5 poules) dans un gros hachoir à viande (Figure 3).



Figure 3 - Étapes de broyage des poulettes et des poules

Ensuite, un échantillon homogène de 800 grammes a été étendu sur un grillage en plastique (bien identifié avec l'étiquette qui contient entre autres le nom de l'éleveur) pour être enveloppé dans du papier film et congelé un minimum de 24 heures avant d'être démoulé en petits cubes et mis dans des sacs plastiques (Figure 4).



Figure 4 - Congélation des échantillons broyés

Finalement les échantillons obtenus ont été analysés pour déterminer le contenu en matière sèche par la méthode de gravimétrie, la teneur en protéine par la méthode de KJELDAHL et la teneur minérale (P, Ca, Na, Mg, ...) par la méthode de digestion avec l'acide sulfurique et dosage par spectrométrie d'émission au plasma (ICAP) au laboratoire de l'IRDA.

4.3 Œufs

Les 36 œufs reçus ont été classés par catégorie (petit, moyen et gros), ils ont été cassés, le jaune et le blanc séparés et mélangés par taille avant d'être lyophilisés puis analysés pour leur teneur en P et Ca (Figure 5). Les échantillons ont été congelés et lyophilisés pour déterminer le % MS (Matière sèche). Des échantillons de coquilles ont été prélevés et séchés à 100 °C durant 12h pour déterminer le % MS, puis broyés pour obtenir une poudre blanche homogène. Le contenu en Ca et P a été déterminé pour le mélange jaune-blanc et le contenu en Ca pour la coquille par la méthode de dosage par spectrométrie d'émission au plasma (ICAP) afin de calculer le facteur de rétention de P de l'œuf.



Figure 5 - Détermination des caractéristiques des œufs

Pour chaque ferme, au cours de la livraison 3, 9 œufs (3 petits, 3 moyens et 3 gros) ont été collectés et radiographiés au DXA (Figure 6). Par la suite, différentes caractéristiques soient, le

poids, la force à la rupture (Figure 7), l'épaisseur de la coquille, le poids de la coquille et le poids du jaune blanc ont été évaluées.

La teneur en Ca de la coquille a ensuite été mesurée par la méthode de dosage par spectrométrie d'émission au plasma (ICP) pour déterminer la relation entre le CMO (g) et la teneur en Ca (g) de la coquille de l'œuf.

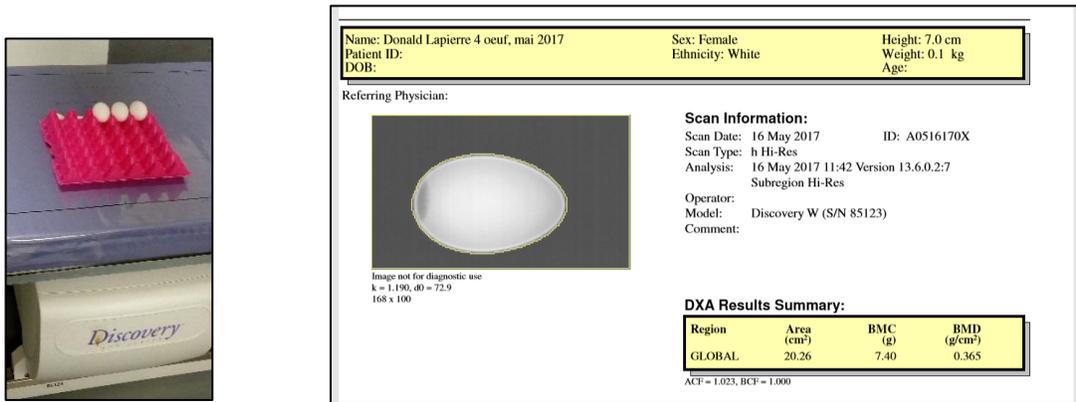


Figure 6 - Exemple de rapport de scan d'œuf obtenu par l'absorptiométrie à rayons X à double énergie (DXA, Hologic®)



Figure 7 - Mesure de la force à la rupture d'un œuf

4.4 Analyses statistiques

L'analyse graphique et statistique des résultats obtenus a été réalisée avec le logiciel (Minitab Inc. version 18).

5. Résultats

5.1 Évaluer la rétention de P chez poulette, pondeuse et œufs

Poulettes

Les poids vifs des poulettes des différentes fermes à différentes périodes d'élevage varient d'une ferme à l'autre avec une moyenne de 52 g pour la première livraison, 752 g pour la deuxième livraison et 1147 g pour la dernière livraison. Les résultats montrent une bonne relation entre le P retenu (g/kg) et le poids vif sans effet de la ferme ($P \text{ corporel (g)} = -0,148 + 0,006637 \times \text{Poids vif (g)}$, $R^2 = 98 \%$; Figure 8). La dérivée de cette équation permet d'obtenir le P retenu par g de gain, paramètre nécessaire pour le calcul du bilan alimentaire. Le coefficient de rétention est donc de $6,6 \pm 0,161 \text{ g P/kg de gain}$.

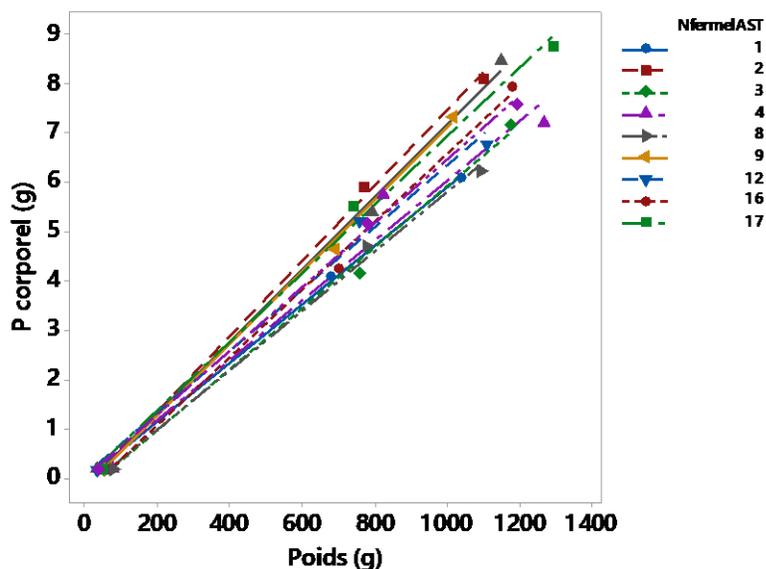


Figure 8 - Teneur en P corporel en fonction du poids des poulettes pour chacune des fermes

Dans la littérature, peu de travaux étaient disponibles pour établir ce coefficient. Les Hollandais (The Hague/Heerlen, 2012) rapportent une valeur de 5,5 g/kg de carcasse pour des poulettes de moins de 17 semaines pour la période de 2003 à 2008 considérant un P alimentaire moyen de 4,8 g/kg. La valeur plus élevée observée pourrait s'expliquer par un P alimentaire largement supérieur au Québec avec une moyenne de $5,5 \pm 0,7 \text{ g/kg}$ (Annexe 1).

Pondeuses

Le poids moyen des poules était de 1366, 1572, 1635, 1714 et 1776 g respectivement pour les livraisons 1 à 5. Des différences étaient tout de même observées entre les fermes (Figure 9) dû à la souche de poule utilisée (blanche (1), brune (2)). Aucune différence significative n'a été observée entre les fermes utilisant la même souche blanche. L'évolution du P corporel moyen obtenu par composition chimique en fonction des semaines de production des poules est variable entre les fermes et aucune tendance à la hausse ou à la baisse ne se dessine (Figure 10). Lorsque le P corporel est exprimé en fonction du poids vif des poules, encore une fois, aucune relation consistante n'est mise en évidence (Figure 10) et les variations ne s'expliquaient pas par

les teneurs en P et Ca dans les aliments. La régression de cette relation n'est pas très bonne (P corporel (g) = $3,97 + 0,00376 (\pm 0,0011) * \text{poids vif (g)}$; $R^2 = 17 \%$), montrant que la rétention chez la poule est variable avec tant des rétentions positives qu'aucune rétention, mais en moyenne elle est de **4 g/kg de gain**.

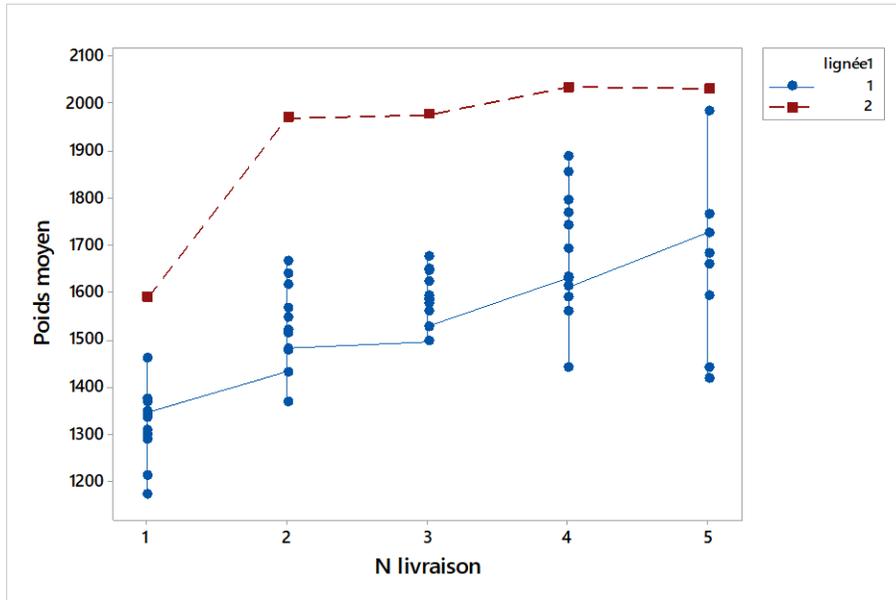


Figure 9 - Poids moyen en fonction du numéro de livraison des poules pour chacune des souches (blanche (1) et brune (2))

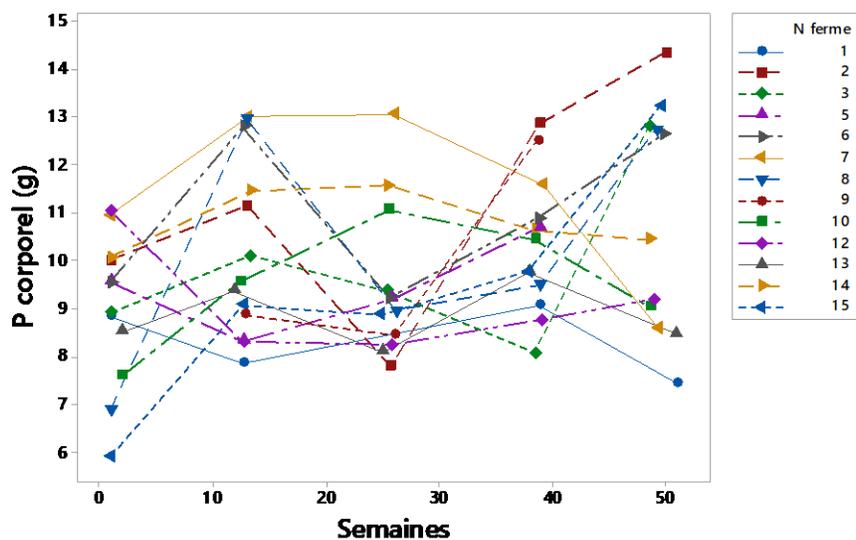


Figure 10 - Teneur en P corporel en fonction de l'âge (en semaine) des poules pour chacune des fermes

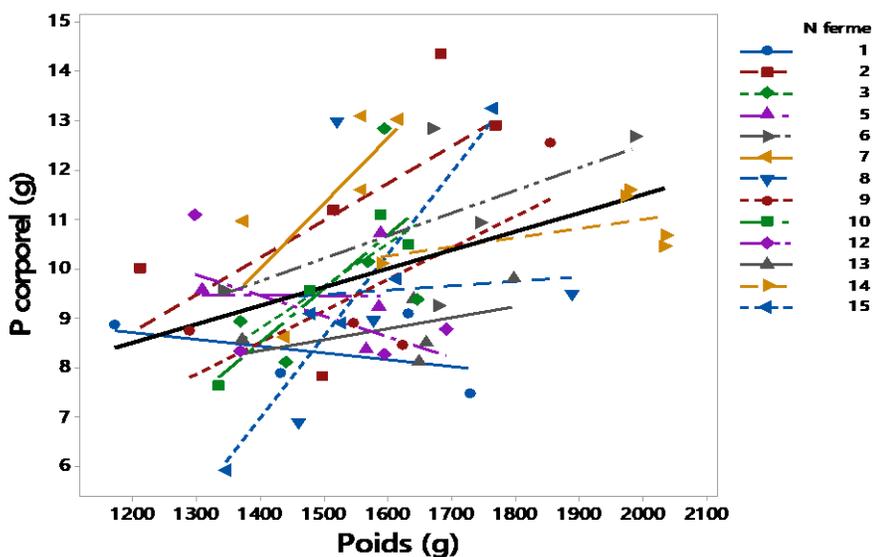


Figure 11 - Teneur en P corporel en fonction du poids des poules pour chacune des fermes

Concernant l'alimentation des poules, en plus des formules théoriques, différents échantillons d'aliments ont été livrés au CRSAD représentant différentes phases d'alimentation. Une différence parfois importante entre la teneur en P analysé et théorique des aliments a été constatée ce qui pourrait être due à un mauvais échantillonnage de l'aliment à la ferme. En effet, il est plus difficile d'obtenir un échantillon représentatif lorsque l'aliment est de texture farineuse, ce qui est souvent le cas dans les élevages de poulettes et de poules pondeuses. Cela pourrait également être dû à une trop faible fréquence d'analyses de laboratoire de la teneur en P de certaines matières premières utilisées pour la fabrication des aliments principalement (les farines de viandes, les drèches et certains autres sous-produits par exemple).

Lambert et al., (2014) ont conclu que la rétention pour les poules est de 5,6 g P/kg de carcasse dans un essai en condition contrôlé d'alimentation ce qui corrobore les valeurs des tables Hollandaises (The Hague/Heerlen, 2012). Il est difficile de savoir pourquoi notre valeur est plus faible et surtout très variables entre les fermes. Néanmoins, compte tenu du gain de poids très faibles des poules, ce coefficient est peu sensible et a donc peu d'impact sur les résultats du bilan alimentaire (voir section 4).

Œufs

La qualité de la coquille d'œuf continue d'être une préoccupation majeure de l'industrie des œufs. Les œufs de qualité inférieure sont une perte économique majeure pour les producteurs d'œufs de consommation (Roberts, 2004). Les mesures de qualité des œufs sont donc essentielles pour les éleveurs, mais sont peu réalisées compte tenu que la majorité des méthodes d'évaluation de la qualité de la coquille et des composants de l'œuf sont invasives et longues. La minéralisation de la coquille joue un rôle clé dans la force de la coquille et sa capacité à résister à la rupture. La technologie DXA est très précise pour mesurer le contenu minéral osseux de différents échantillons et pourrait donc l'être pour l'œuf. Cette technologie offrirait donc un avantage par

rapport à d'autres méthodes invasives ou non d'évaluation des œufs en évaluant plusieurs paramètres en une seule analyse (England et al., 2012).

L'analyse des œufs en P et Ca n'a pas montré d'effet ferme ou taille des œufs. On observe cependant une bonne différence entre la livraison 1, qui correspond au tout début de la ponte, et les deux autres (Figure 11). La deuxième livraison est celle qui représente plus de 50 % des œufs produits et a donc été choisie pour estimer le coefficient de rétention qui est de **1,8 ± 0,0031 g de P/kg d'œuf**.

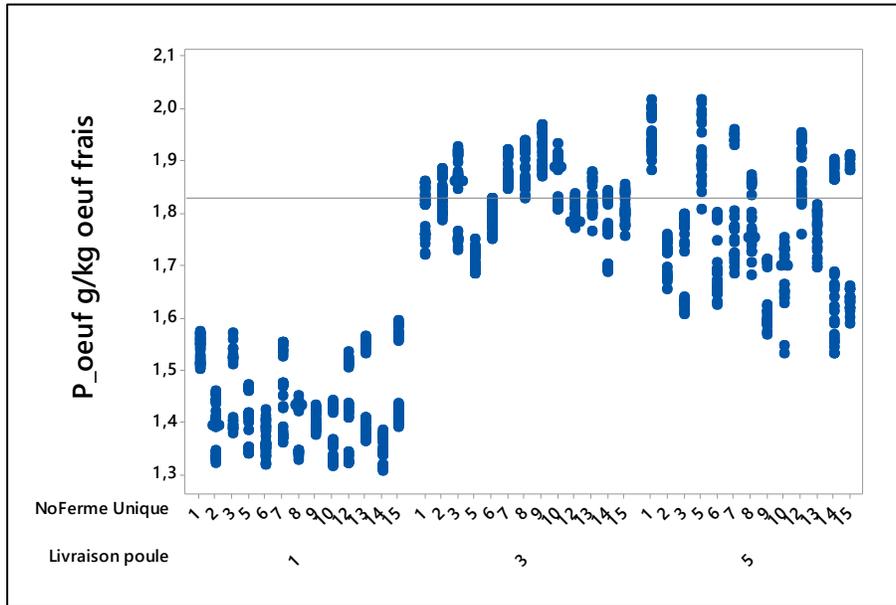


Figure 12 - Teneur en P des œufs g/Kg d'œuf frais en fonction du numéro de livraison pour chacune des fermes

Les résultats obtenus de la rétention en P des œufs (1,8 g/Kg d'œuf) coïncident avec les résultats de Lambert et al., (2014) et The Hague/Heerlen (2012). De plus, suite à des suivis dans le temps, ces derniers auteurs ont conclu que la teneur en P des œufs était stable au fil du temps, même lorsque les poules pondeuses étaient nourries avec des régimes dont les apports phosphocalciques variaient.

5.2 Utilisation de la technologie DXA pour prédire et revalider les coefficients de rétention de P établis

Le but était de déterminer le lien entre le CMO et la DMO et le P corporel. Ces relations ont été établies par régression linéaire simple où le CMO ou la DMO ont été utilisés comme variable de prédiction du phosphore corporel. Dans une optique de validation des coefficients présentés dans la section précédente, les teneurs de P corporel obtenues pourront être comparées avec celle observée dans le présent projet et une règle de trois pourra permettre de revalider le coefficient de rétention de P.

Poulettes

Chez les poulettes, une augmentation linéaire des teneurs corporelles en Ca et P ainsi qu'en CMO et DMO a été observé. Il existe une très bonne corrélation entre le P corporel (g) et le CMO (Tableau 1; Figure 12). Il serait ainsi possible de radiographier des poulettes et de prédire leur P corporel et ainsi savoir si elles sont conformes à ce qu'on a mesuré dans le présent essai. Il est à noter que le fait qu'aucun effet ferme n'a été observé montre que les poulettes recevaient des apports de P et Ca au-delà des besoins et étaient donc à leur potentiel de minéralisation osseuse.

Tableau 1 - Relation entre le P corporel estimé par broyage des carcasses et le CMO obtenu par DXA

Terme	Coefficients	Valeur de P
Ordonnée à l'origine	-0,353	0,101
CMO (g)	0,100	<0,001
CMO(g)*CMO(g)	-0,000313	<0,001
R ²	98%	

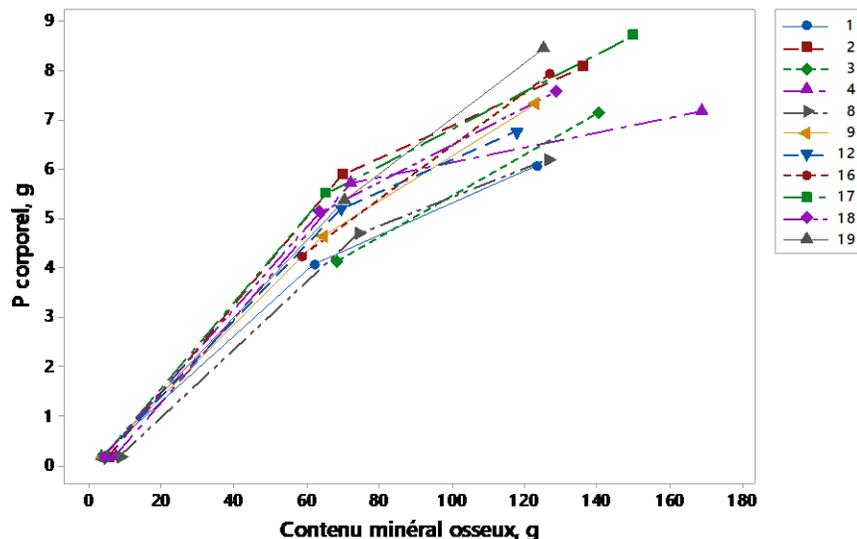


Figure 13 - Teneur en P corporel en fonction du contenu minéral osseux des poulettes pour chacune des fermes

Poules pondeuses

Les résultats présentés à la Figure 14 montrent qu'il y a une très faible relation entre le contenu en P corporel (g) des poules pondeuses et le CMO. La raison exacte est inconnue, mais il est possible que la présence d'œuf en formation ou d'aliment dans le jabot et le gésier (Figure 14) malgré la mise à jeun ne soit pas bien estimée par le scan comparativement à la teneur corporelle suite au broyage. De plus, les 5 poules envoyées par les fermes n'étaient peut-être pas représentatives de l'élevage.



Figure 14 - Teneur en P corporel en fonction du contenu minéral osseux des poules pondeuses pour chacune des fermes

5.3 Utilisation de la technologie DXA pour prédire et revalider les coefficients de rétention de P établis dans les œufs et comme mesure de qualité de la coquille

Les résultats montrent une très bonne relation linéaire entre le contenu minéral osseux et le poids de la coquille sèche (Figure 15; **Poids de la coquille sec (g) = -1,201 + 1,04 BMC (g); R² = 95 %**)

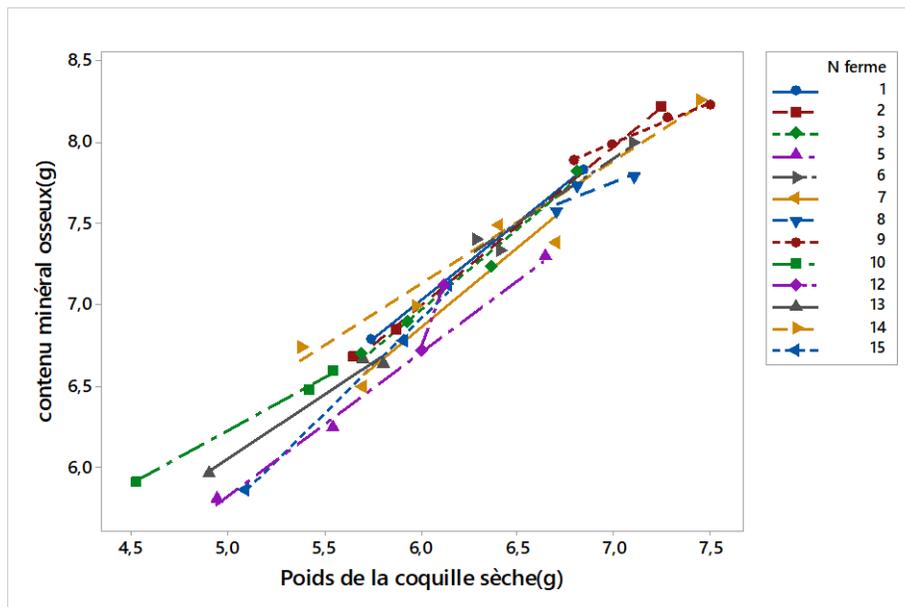


Figure 15 - Contenu minéral osseux en fonction du poids de la coquille sèche pour chacune des fermes

La relation entre le contenu minéral osseux et la teneur en calcium de la coquille est par contre un peu moins bonne (Figure 16; **Ca coquille sèche (g) = -0,400 + 0,3674 contenu minérale osseux (g); R² = 86 %**)

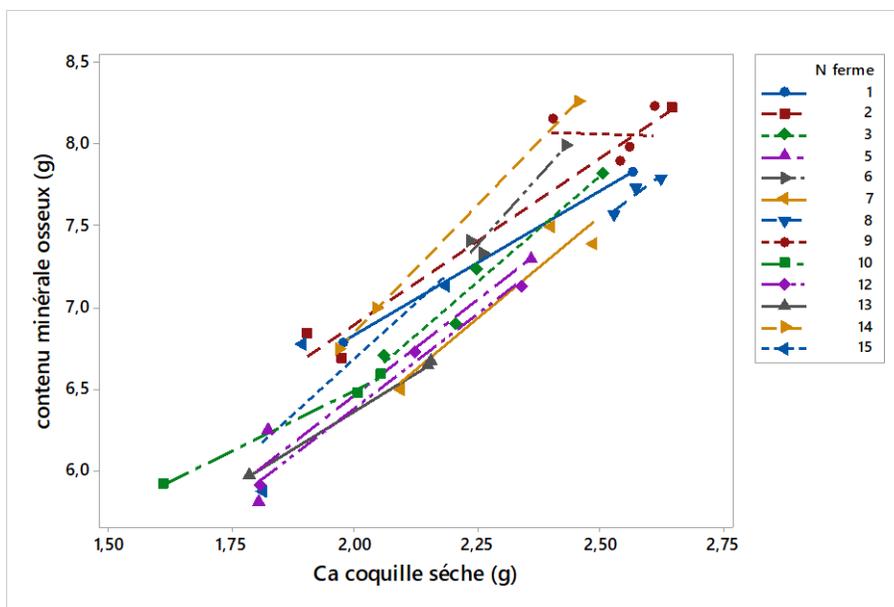


Figure 16 - Contenu minéral osseux en fonction du contenu en Ca de la coquille en fonction de la ferme

Le Ca est l'un des principaux nutriments nécessaires à la formation et à la qualité optimale des coquilles des poules pondeuses (Ahmed et al., 2013). Les résultats disponibles actuellement concernant l'effet des niveaux de Ca alimentaire sur la qualité de la coquille sont quelques peu incohérents. Alors que la plupart des études ont montré une diminution linéaire de la qualité de la coquille lorsque le Ca est réduit (Saffa et al., 2008 ; An et al., 2016) ou encore une incidence plus élevée d'œufs fêlés (Jiang et al., 2013), d'autres études n'ont pas montré d'effet de l'apport de Ca sur la qualité de la coquille (Keshavarz et Nakajima, 1993; Cufadar et al., 2011).

D'autre part, en étudiant le système de régulation du Ca chez les poules pondeuses, Taylor (1963) et Kim et al., (2012) ont montré qu'en cas de carence alimentaire de Ca, les poules mobilisent leurs réserves osseuses de Ca pour répondre au besoin de la formation de la coquille. La relation entre le poids de la coquille sèche et le CMO et le contenu en Ca de la coquille et le CMO est très bonne dans la présente étude. Ceci confirme que l'utilisation du DXA offrirait un avantage par rapport à d'autres mesures non destructives (et aussi destructives) d'évaluation des œufs en évaluant plusieurs paramètres en une seule analyse rapide.

5.4 Exercices de réalisation des bilans alimentaires

En plus de fournir des poules, des œufs et des échantillons d'aliments, les élevages participants au projet ont également fourni l'ensemble des données nécessaires à la réalisation des bilans alimentaires. Cet exercice de réalisation de bilan alimentaire avait pour objectif, dans un premier temps, de documenter la facilité de collecte de données, la variabilité du mode de collecte entre différents éleveurs ainsi que les éventuels défis ou lacunes en lien avec la collecte de ces données. Dans un second temps, les résultats des bilans alimentaires ont servi à la réalisation de l'analyse de sensibilité ainsi qu'à l'établissement du critère de validation des résultats du bilan alimentaire. Voici donc les conclusions tirées de cet exercice.

Tout d'abord, il est à noter que 2 producteurs ont été retirés du projet dû à un manque de données reçues, représentant ainsi 2 élevages de production d'œufs et 2 élevages de poulettes. Au total, c'est donc 23 élevages au lieu de 27 dont le bilan alimentaire a été réalisé. Lors de la collecte des données, l'ensemble des producteurs comptabilisaient déjà les données nécessaires à la réalisation du bilan alimentaire, mais certains éleveurs compilaient beaucoup d'informations en comparaison avec d'autres producteurs ce qui permettaient d'aller plus loin et de valider de plusieurs façon certaines données. Ainsi, il est facile et rapide de réaliser le bilan alimentaire de certains producteurs alors que pour d'autres cela nécessitait davantage de temps (données informatisées en comparaison à des données manuscrites par exemple).

En ce qui a trait aux quantités d'aliments servis aux poules pour chaque type d'aliment, les données récoltées de base sont principalement les données de quantité d'aliments distribués comptabilisés par des systèmes automatisés à la ferme. Cependant, ce système ne permet pas de distinguer précisément les quantités par type d'aliment, mais plutôt la quantité totale distribuée à chaque jour. Ainsi, il est important, dans le cadre de la réalisation d'un bilan alimentaire, que les quantités servies soit par type d'aliment (quantité pour la phase pré-ponte, quantité pour la phase ponte, etc.) c'est-à-dire les quantités des différents types d'aliments livrés moins les inventaires en début et en fin de lot. Les données collectées par les compteurs automatisés à la ferme demeurent néanmoins pertinentes à comptabiliser car elles permettent de valider que la quantité totale distribuée pendant l'élevage est semblable à la quantité totale des différents types d'aliments servis.

Concernant les élevages possédant leur propre meunerie et fournissant des aliments à d'autres producteurs, certains d'entre eux avaient de la difficulté à fournir des données fiables par type d'aliment pour leur propre élevage, mais étaient en mesure d'être précis sur les aliments qu'ils fabriquaient pour leurs clients. Si ces producteurs souhaitent éventuellement réaliser un bilan alimentaire pour leurs propres élevages, ils devront alors simplement préciser les données destinées à leur propre élevage, car des quantités par type d'aliment doivent être les plus exactes possible afin d'obtenir un résultat fiable. D'ailleurs, les quantités d'aliment servi doivent être basées sur des pesées et non pas sur des estimations basées sur des dates de changement de moulée.

Finalement, la réalisation des bilans alimentaire a permis de mettre de l'avant des points clés pour l'analyse de sensibilité. Le principal point est que les élevages de poulettes et les productions d'œufs de consommation retiennent en moyenne autour de 25 et 20 % respectivement du phosphore qui leur sont servi (Figure 17 et 18). Dans le cas des productions d'œufs, 1 % seulement est associée à la rétention des poules spécifiquement signifiant ainsi que la majeure partie du phosphore retenu est dans les œufs (Figure 18). Ces constatations mettent donc l'emphase sur l'importance de l'exactitude du phosphore servi en comparaison avec le phosphore retenu, et du phosphore retenu dans les œufs en comparaison avec celui retenu par les poules pondeuses.

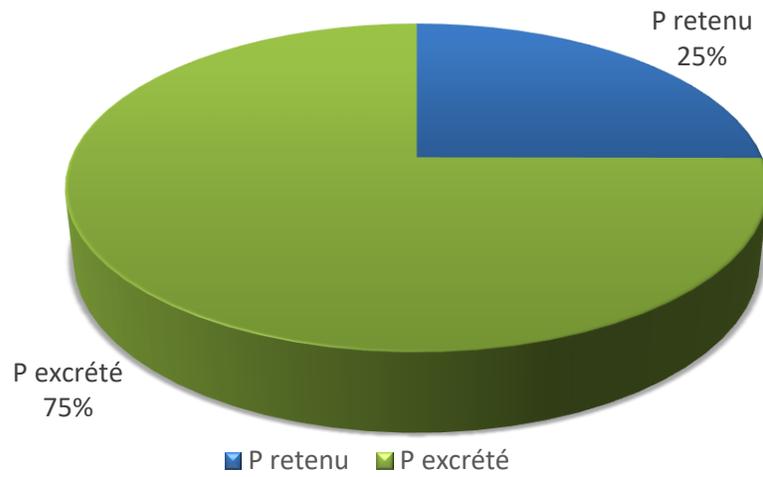


Figure 17 - Proportion du phosphore servi qui est retenu pour un élevage type de poulettes

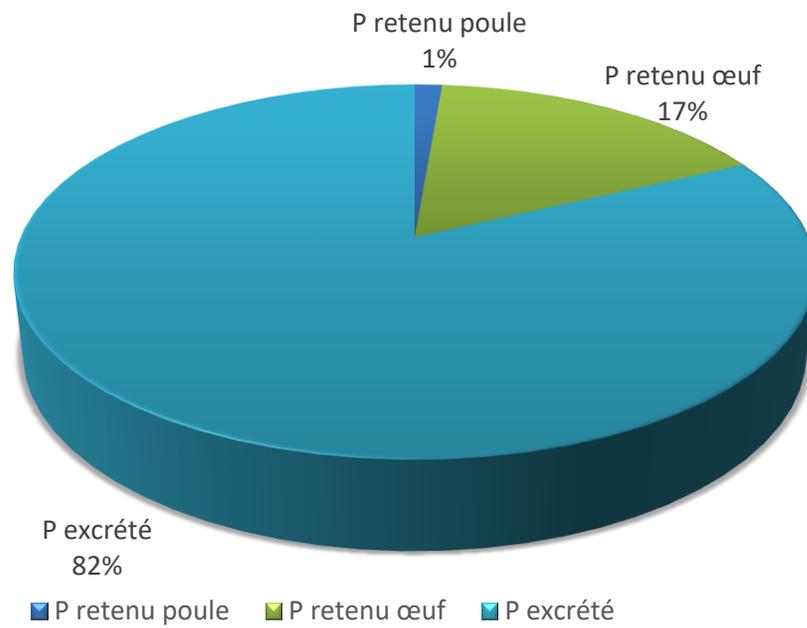


Figure 18 - Proportion du phosphore servi qui est retenu pour une production type d'œufs

5.5 Analyse de sensibilité

Contexte

L'analyse de sensibilité consiste à évaluer l'impact de la variation de chacun des paramètres de l'équation du bilan alimentaire sur le résultat de l'équation, soit ici le phosphore excrété. Cette analyse nous permet de cibler les paramètres qui influencent le plus l'excrétion de phosphore. En fonction des résultats obtenus, des bonnes pratiques pour minimiser l'erreur en maîtrisant les points sensibles du calcul seront données aux utilisateurs par l'entremise d'un guide technique (Cloutier et Lemelin, 2018).

Méthodologie

L'analyse de sensibilité a été effectuée en estimant l'incertitude sur des paramètres communément connus sur une ferme commerciale. Par exemple, pour un élevage de poulettes, l'équation du bilan alimentaire sur le P excrété est donnée par :

$$P \text{ excrété} = P \text{ servi}^{(a)} - P \text{ retenu}^{(b)}$$

avec

^(a) P servi (g) = quantité d'aliment servi (kg) × teneur en P de l'aliment (g de P/kg d'aliment)

^(b) P retenu (g) = gain de poids (kg) × rétention en P (g de P/kg de gain)

où

gain de poids (kg) = (nombre de poulettes vendues ou sorties × poids moyen à la sortie (kg)) + (nombre de poulettes mortes × poids moyen des poulettes mortes (kg)) – (nombre de poulettes entrées × poids moyen à l'entrée(kg)).

L'analyse a consisté à faire varier chacun des critères en plus et en moins par rapport aux variations pouvant être rencontrées sur le terrain en prenant l'exemple d'un troupeau de 25 000 poules pour un élevage de poulettes et pour une production d'œufs de consommation. Pour ce faire, l'écart-type de chaque paramètre a été estimé selon l'avis d'experts en production avicole provenant de différents milieux et possédant différentes expertises, soit des experts en nutrition, des directeurs de production, des conseillers techniques et des producteurs (Tableaux 2 et 3).

Il est à noter que ces écarts-types ont été établis à l'échelle du troupeau (moyenne ou total des animaux) et non à l'échelle individuelle. De plus, les estimations présentées sont prudentes et se rapprochent parfois davantage d'une étendue maximale que d'un écart-type.

La provenance des valeurs de chacun des paramètres, renseignée dans les tableaux, est celle actuellement utilisées par la plupart des producteurs et, en fonction des résultats de l'analyse de sensibilité, des recommandations sur la provenance recommandée pour la réalisation du bilan alimentaire seront faites au besoin.

Tableau 2 - Écart-type des paramètres du calcul du bilan alimentaire pour un élevage de poulettes

Paramètres	Écart-type (± %)	Provenance de la valeur du paramètre et justifications de l'établissement de la valeur de variance
<i>Nombre de poussins entrés</i>	0,5	Provenance : Registres d'achat Justification : Sondage auprès des experts.
<i>Poids moyen des poussins entrés, kg</i>	30,0	Provenance : Valeur fixée à 0,04, ou valeur personnalisée à l'entreprise si disponible Justification : Sondage auprès des experts mentionnant que le poids moyen des poussins varie entre 0,03 et 0,05 kg.
<i>Nombre de poulettes mortes</i>	6,0	Provenance : Registre de mortalité Justification : Sondage auprès des experts.
<i>Poids moyen des poulettes mortes, kg</i>	30,0	Provenance : Registre de mortalité ou estimation Justification : Sondage auprès des experts.
<i>Nombre des poulettes sorties</i>	0,5	Provenance : Registre de vente ou de transfert d'animaux Justification : Sondage auprès des experts.
<i>Poids moyen des poulettes sorties, kg</i>	5,0	Provenance : Poids provenant d'une pesée de type échantillonnage Justification : Sondage auprès des experts.
<i>Rétention en P, g/kg</i>	3,0	Provenance : Valeur fixée à 6,6 g P / kg pour tous les élevages. Justification : L'écart-type a été basé sur les résultats des essais expérimentaux (voir section 3.2)
<i>Quantité d'aliment servi (total), kg</i>	2,0	Provenance : Valeur provenant des registres d'achat d'aliments ou d'ingrédients dont les quantités proviennent d'une pesée + inventaires en début et en fin de période d'évaluation ou de lot Justification : Sondage auprès des experts dont l'écart-type est en fonction de la précision de la balance de la meunerie et la fréquence des livraisons.
<i>Teneur en phosphore de l'aliment, %</i>	11,0	Provenance : Valeur inscrite sur l'étiquette Justification : Sondage auprès des experts et basée sur les variabilités observées dans le présent projet.

Tableau 3 - Écart-type des paramètres du calcul du bilan alimentaire pour une production d'œufs de consommation

Paramètres	Écart-type (± %)	Provenance de la valeur du paramètre et justifications de l'établissement de la valeur de variance
Nombre de poules entrées	0,5	Provenance : Registres d'inventaire Justification : Sondage auprès des experts
Poids moyen des poules entrées (kg)	5,0	Provenance : Registres d'inventaire Justification : Sondage auprès des experts
Nombre de poules mortes	10,0	Provenance : Registre mortalité Justification : Sondage auprès des experts.
Poids moyen des poules mortes (kg)	5,0	Provenance : Registre mortalité ou estimation Justification : Sondage auprès des experts.
Nombre d'œufs produits	1,0	Provenance : Registre de vente Justification : Sondage auprès des experts et basé sur les données récoltées dans le cadre de ce projet.
Poids moyen des œufs produits (kg)	5,0	Provenance : Registre de vente Justification : Sondage auprès des experts.
Nombre de poules sorties	0,5	Provenance : Registre de vente Justification : Sondage auprès des experts.
Poids moyen des poules sorties (kg)	5,0	Provenance : Valeur provenant de l'abattoir Justification : Sondage auprès des experts.
Quantité d'aliments servi (kg)	1,0	Provenance : Valeur provenant des registres d'achat d'aliments ou d'ingrédients dont les quantités proviennent d'une pesée + inventaires en début et en fin de période d'évaluation ou de lot Justification : Sondage auprès des experts.
Teneur P aliment (g/kg)	11,0	Provenance : Valeur inscrite sur l'étiquette Justification : Sondage auprès des experts et basée sur les variabilités observées dans le présent projet.
Rétention en P des poules (g/kg)	100	Provenance : Valeur fixée à 4,0 g P / kg pour tous les élevages. Justification : L'écart-type a été basé sur les résultats des essais expérimentaux (voir section 3.3). L'écart-type est important car de grands écarts entre les rétentions de différents groupes de poules ont été observé, allant d'aucune rétention à des rétentions de près du double de la valeur moyenne.
Rétention en P des œufs (g/kg)	4,0	Provenance : Valeur fixée à 1,8 g P / kg pour tous les élevages. Justification : L'écart-type a été basé sur les résultats des essais expérimentaux (voir section 3.2)

Résultats et discussion

Le facteur qui influence le plus le P excrété chez la poulette et la production d'œufs de consommation est la teneur en phosphore de l'aliment (Tableau 4, 5), ce dernier est un facteur multiplicatif qui détermine la quantité de P qui entre dans l'élevage. Dans le cadre de la réalisation d'un bilan alimentaire, ce paramètre doit être le plus précis possible, c'est-à-dire que la valeur de P utilisée doit provenir d'analyses de laboratoire récentes et personnalisées en fonction de l'élevage. Il est d'ailleurs non indiqué d'utiliser la valeur de l'étiquette des aliments, car elle est un peu plus variable puisqu'elle représente des teneurs moyennes de l'aliment et non pas une valeur personnalisée en fonction du lot d'aliments récemment fabriqué. Bref, la teneur en P des aliments doit être basée sur des analyses de laboratoire. De plus, il est recommandé de faire des analyses sur les ingrédients plutôt que les aliments, particulièrement dans le cas d'aliments de texture farineuse. En effet, le présent projet a mis en évidence la difficulté d'obtenir un échantillon d'aliment représentatif lorsque l'aliment est de texture farineuse car une ségrégation des particules de l'aliment, donc les différents ingrédients, se produit. Il est donc recommandé de réaliser plutôt des analyses de laboratoire sur les ingrédients et, considérant les quantités utilisées de chaque ingrédient pour les différents types d'aliment, il est donc possible de calculer la teneur en P de l'aliment. En utilisant des teneurs en P basées sur des analyses de laboratoire dont la variabilité mensuelle est captée par le biais de prélèvements mensuels ou d'analyses de laboratoire mensuels, l'écart-type de ce paramètre pourrait donc être réduit. Voici donc les recommandations en lien avec la provenance des aliments.

Aliments complets achetés d'une meunerie

La teneur en P total des aliments doit provenir d'une valeur certifiée par le meunier, qui a été établie à partir d'ingrédients qui ont été analysés au laboratoire pour le phosphore. La variabilité mensuelle du phosphore des ingrédients devra être captée par le biais d'analyses de laboratoire mensuelles pour les principales sources de phosphore. En effet, il est recommandé qu'au minimum 80 % de l'apport en P des aliments soit basé sur des analyses de laboratoire mensuelles. Cela signifie donc qu'il ne sera pas obligatoire d'analyser à chaque mois un ingrédient fournissant un faible apport en phosphore, une valeur théorique pouvant convenir.

Aliments fabriqués à la ferme

Pour les élevages fabriquant leurs aliments à la ferme et étant en mesure de peser les aliments produits par type d'aliment, la teneur en P total proviendra d'une valeur calculée établie à partir des ingrédients qui ont été analysés au laboratoire pour le phosphore ou dont la valeur de P des ingrédients provient d'une meunerie pouvant certifier une valeur basée sur des analyses de laboratoire. Il est recommandé qu'au minimum 80 % de l'apport en P des aliments soit basé sur des analyses de laboratoire. Cela signifie donc qu'il ne sera pas obligatoire d'analyser un ingrédient fournissant un faible apport en phosphore, une valeur théorique pouvant convenir. Pour les ingrédients ou prémélanges achetés auprès d'une meunerie, la valeur de P total doit provenir de la meunerie pouvant certifier une valeur basée sur des analyses de laboratoire. Pour les ingrédients produits à la ferme, l'éleveur a deux choix : (1) prendre chaque mois un prélèvement de l'ingrédient concerné (500 g/prélèvement), combiner ces prélèvements à la fin de la période d'évaluation, bien mélanger le tout, puis en extraire un échantillon composite (environ 500 g) qui sera analysé au laboratoire; ou (2) utiliser une valeur de P total provenant du fournisseur d'ingrédients analysant régulièrement le même type d'ingrédients et pouvant certifier une valeur en P total fiable (valeur moyenne basée sur plusieurs lots d'ingrédients analysés).

Les autres critères du bilan alimentaire sont très peu sensibles en comparaison avec la teneur en P des aliments. Cela s'explique principalement par le fait que les élevages de poulettes et les productions d'œufs de consommation retiennent au maximum 30 % et 25 % respectivement de ce qui leur ait servi. Par conséquent, la variabilité des paramètres reliés au phosphore servi sont plus sensibles que ceux reliés au phosphore retenu. Plus encore, pour les productions d'œufs de consommation, la rétention des animaux en comparaison avec les œufs ne représente que 5 à 10 % de la rétention globale, 90 à 95 % de la rétention en phosphore étant fait par le biais des œufs. Les paramètres reliés aux gains de poids des poules pondeuses ont donc vraiment très peu d'impact sur la variabilité des résultats du bilan alimentaire.

Tableau 4 - Résultats de l'analyse de sensibilité pour un élevage de poulettes

Paramètres	Données ferme	Écart -type (± %)	Impact unitaire de l'écart-type	Impact de l'écart-type sur les résultats du bilan alimentaire (%)	
				Minimum	Maximum
Nombre poules entrées	25 000	0,5	125	100,0	100,0
Poids moyen poules entrées, kg*	0,04	30,0	0,012	99,7	100,3
Nombre poules mortes	500	6,0	30	100,0	100,0
Poids moyen poules mortes, kg	0,72	30,0	0,216	100,1	99,9
Nombre poules sorties	24 500	0,5	122,5	100,2	99,8
Poids moyen poules sorties, kg	1,40	5,0	0,07	101,7	98,3
Rétention en P poulette, g/kg*	6,60	3,0	0,198	101,0	99,0
Quantité d'aliment servi, kg	150 000	2,0	3 000	97,3	102,7
Teneur en phosphore de l'aliment, %	6,00	11,0	0,66	85,4	114,6

* Valeur fixe pour tous les élevages de la même catégorie

Tableau 5 - Résultats de l'analyse de sensibilité pour une production d'œufs de consommation

Paramètres	Données ferme	Écart-type (± %)	Impact unitaire de l'écart-type	Impact de l'écart-type sur les résultats du bilan alimentaire (%)	
				Minimum	Maximum
Nombre poule entrée	25 000	0,5	125	100,0	100,0
Poids moyen poule entrée, kg	1,40	5,0	0,07	99,8	100,2
Nombre poules mortes	1000	10,0	100	100,0	100,0
Poids moyen poules mortes, kg	1,50	5,0	0,075	100,0	100,0
Nombre œufs produits	8 000 000	1,0	80 000	100,2	99,8
Poids moyen des œufs produits, kg	0,06	5,0	0,003	101,0	99,0
Nombre poules sorties	24 000	0,5	120	100,0	100,0
Poids moyen poules sorties, kg	2,00	5,0	0,1	100,2	99,8
Rétention en P poule, g/kg	4,00	100,0	4	101,3	98,7
Rétention en P œuf, g/kg	1,80	4,0	0,072	100,8	99,2
Quantité d'aliment servi, kg	1 050 000	1,0	10 500	98,8	101,2
Teneur en phosphore de l'aliment, %	5,00	11,0	0,55	86,7	113,3

Cas de la litière

Certains types d'élevage de poulettes ou de production d'œufs de consommation utilisent de la litière. Pour la très grande majorité de ces élevages, la litière utilisée est de la rive de bois, litière contenant très peu de phosphore (Chandrasekaran et al., 2012; Ouyed, 2005). Dans le cas particulier de la rive de bois, il n'est donc pas nécessaire de prendre ce type de litière en considération dans le calcul du bilan alimentaire. Cependant, si un autre type de litière est utilisé, une analyse de laboratoire doit être faite sur la litière et les quantités utilisées en cours d'élevage devront être comptabilisées afin d'établir la quantité de P apportée par la litière qui se retrouve dans les effluents d'élevage.

En résumé

La fiabilité des résultats du bilan alimentaire s'appuie sur la disponibilité et l'exactitude des données récoltées. La réalisation d'une analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence les paramètres plus sensibles du calcul et des exigences minimales sont recommandées en lien avec la provenance des valeurs utilisées pour la réalisation des bilans alimentaires.

Les résultats de cette analyse de sensibilité ont montré que c'est la valeur de teneur en P des aliments qui est le paramètre le plus sensible de tous, et ce, autant pour les élevages de poulettes que les productions d'œufs de consommation exigeant ainsi des analyses de laboratoire.

Les autres paramètres du calcul étant des données déjà amassées de manière systématique par la très grande majorité des éleveurs, peu de changements sont à apporter pour obtenir les valeurs des paramètres nécessaires au calcul du bilan alimentaire.

5.6 Calcul de l'incertitude sur l'estimation du phosphore excrété

Contexte

Le calcul du phosphore excrété fait intervenir plusieurs variables disponibles à la ferme et certains paramètres liés à la composition de l'aliment et à la rétention par l'animal. Une estimation de l'incertitude pour chacun de ces termes a été nécessaire pour déterminer l'incertitude sur l'estimation du phosphore excrété, les valeurs d'incertitude correspondant aux écart-types établies à la section 5.5 du présent rapport. La présente section détaille les variables d'entrée pour le calcul, l'incertitude associée à chacune de ces variables et la méthode d'estimation de l'incertitude sur le phosphore excrété.

Élevage de poulettes

Hormis la rétention en P, toutes les variables nécessaires pour le calcul du phosphore excrété peuvent être calculées ou estimées à la ferme ou à la meunerie. Le phosphore excrété et son incertitude sont calculés à partir des variables du Tableau 6 et de certaines variables intermédiaires (Tableau 7).

L'écart-type relatif (%) ou coefficient de variation sur le phosphore excrété calculé pour un élevage de poulettes typique est de 15,0 % (Tableau 8). Les éléments suivants sont à considérer :

- L'incertitude sur la quantité d'aliment servi devrait augmenter si le producteur utilisait ses propres récoltes. Avec un écart-type sur la quantité d'aliment de 5 % (basé sur l'avis d'experts), l'écart-type relatif (%) sur le phosphore excrété serait de 16,2 %.
- Autrement, les écarts-types estimés au Tableau 6 étaient soit basés sur des données réelles, soit sur l'avis d'experts. Dans ce dernier cas, les valeurs choisies étaient

légèrement surestimées afin de ne pas sous-estimer l'écart-type relatif (%) sur le phosphore excrété.

- Les écart-types sont estimés pour un lot. Les écarts-types annuels relatifs (%) devraient être plus petits.
- Pour simplifier l'interprétation, les écarts-types relatifs (%) sur les valeurs d'entrée ont été considérés constants. En réalité, il est fort probable que l'écart-type relatif de certaines variables diminue lorsque le nombre d'animaux augmente.
- Il y a possiblement de la corrélation positive pour les couples de variables suivants : nombre d'animaux à l'entrée (N_e) et nombre animaux sortis (N_s), poids à l'entrée (W_e) et à la sortie (W_s). Comme des différences sont calculés à partir de ces couples (Tableau 7), les variances réelles sont possiblement inférieures à celles calculées au Tableau 8.

Tableau 6 - Variables d'entrée nécessaires pour le calcul du phosphore excrété en élevage de poulettes.

**(Les valeurs en entrée sont un exemple pour une ferme donnée et variera d'une ferme à l'autre. L'écart-type intra-lot (%) est considéré fixe d'une ferme à l'autre)*

Variable d'entrée (symbole pour les équations)	Valeur entrée	Écart-type intra-lot	
		%	Valeur absolue
Nombre d'animaux à l'entrée (N_e)	25 000	0,5	125
Poids (kg) moyen à l'entrée (W_e)	0,04	30,0	0,012
Poids (kg) moyen mort/perdu (W_m)	0,72	30,0	0,216
Nombre d'animaux à la sortie (N_s)	24 500	0,5	122,5
Poids (kg) moyen à la sortie (W_s)	1,40	5,0	0,07
Rétention en P (R_P)	$6,6 \times 10^{-3}$	3,0	$1,98 \times 10^{-4}$
Quantité (kg) d'aliment servi au total (Q)	150 000	2,0	3 000
Teneur en phosphore de l'aliment (C_P)	$6,0 \times 10^{-3}$	11,0	$6,6 \times 10^{-4}$

Tableau 7 - Calcul du phosphore excrété et de son incertitude pour un lot de poulettes.

Variable calculée (symbole pour les équations)	Valeur estimée	Variance estimée*
Nombre d'animaux morts/perdus (N_m)	$N_e - N_s$	$\sigma^2(N_e) + \sigma^2(N_s)$
Gain de poids (kg) moyen mort/perdu (G_m)	$W_m - W_e$	$\sigma^2(W_m) + \sigma^2(W_e)$
Gain de poids (kg) moyen à la sortie (G_s)	$W_s - W_e$	$\sigma^2(W_s) + \sigma^2(W_e)$
Gain de poids (kg) total du lot (G_T)	$N_s G_s + N_m G_m$	$\sigma^2(G_s) N_s^2 + \sigma^2(N_s) G_s^2 + \sigma^2(G_m) N_m^2 + \sigma^2(N_m) G_m^2$
P total (kg) servi (P_i)	$Q C_P$	$\sigma^2(C_P) Q^2 + \sigma^2(Q) C_P^2$
P total (kg) retenu (P_r)	$G_T R_P$	$\sigma^2(R_P) G_T^2 + \sigma^2(G_T) R_P^2$
P total (kg) excrété (P_e)	$P_i - P_r$	$\sigma^2(P_i) + \sigma^2(P_r)$

*La variance a été estimée par un développement limité de premier ordre en supposant l'indépendance entre les variables utilisées dans le calcul de la valeur estimée. Le terme $\sigma^2(X)$ réfère à la variance **absolue**, soit le carré de l'écart-type **absolu**, de la variable X.

Tableau 8 - Exemple de calcul du phosphore excrété pour un lot de poulettes basé sur les valeurs d'entrée du Tableau 2.

Variable calculée (symbole pour les équations)	Valeur estimée	Variance estimée	Coefficient de variation (%)
Nombre d'animaux morts/perdus (N_m)	$25\ 000 - 24\ 500 =$ 500	$125^2 + 122,5^2 = 30\ 631$	35,0
Gain de poids (kg) moyen mort/perdu (G_m)	$0,72 - 0,04 = 0,68$	$0,216^2 + 0,012^2 = 0,0468$	31,8
Gain de poids (kg) moyen à la sortie (G_s)	$1,40 - 0,04 = 1,36$	$0,07^2 + 0,012^2 = 0,0050$	5,2
Gain de poids (kg) total du lot (G_T)	$(24\ 500 \cdot 1,36) +$ $(500 \cdot 0,68) =$ 33 660	$(0,0050 \cdot 24\ 500^2) + (122,5^2 \cdot$ $1,36^2) + (0,0468 \cdot 500^2) + (30$ $631 \cdot 0,68^2) = 3,08 \times 10^6$	5,2
P total (kg) servi (P_i)	$150\ 000 \cdot 0,006 =$ 900	$(6,6 \times 10^{-4})^2 \cdot (150\ 000)^2 + 3000^2$ $\cdot (0,006)^2 = 10\ 125$	11,2
P total (kg) retenu (P_r)	$33\ 660 \cdot 0,0066 =$ 222	$(1,98 \times 10^{-4})^2 \cdot (33\ 660)^2 + 3,08 \times$ $10^6 \cdot (0,0066)^2 = 179$	6,0
P total (kg) excrété (P_e)	$900 - 222 = 678$	$10\ 125 + 179 = 10\ 304$	15,0

Élevage de pondeuses

À partir des variables d'entrée pour un élevage de pondeuses (Tableau 9) et des équations du Tableau 10, l'écart-type relatif (%) sur le phosphore excrété dans un lot d'un élevage de pondeuses typique est estimée à 13,5 % (Tableau 11). Les éléments suivants sont à considérer :

- L'incertitude sur la quantité d'aliment ingéré devrait augmenter si le producteur utilisait ses propres récoltes. Avec un écart-type sur la quantité d'aliment de 5 % (basé sur l'avis d'experts), l'écart-type relatif (%) sur le phosphore excrété serait de 14,8 %.
- Autrement, les écarts-types estimés au Tableau 9 étaient soit basés sur des données réelles, soit sur l'avis d'experts. Dans ce dernier cas, les valeurs choisies étaient légèrement surestimées afin de ne pas sous-estimer l'écart-type relatif (%) sur le phosphore excrété.
- Pour simplifier l'interprétation, les écarts-types relatifs (%) sur les valeurs d'entrée ont été considérés constants. En réalité, il est fort probable que l'écart-type relatif de certaines variables diminue lorsque le nombre d'animaux augmente.
- Il y a possiblement de la corrélation positive pour les couples de variables suivants : nombre d'animaux à l'entrée (N_e) et nombre animaux sortis (N_s), et poids à l'entrée (W_e) et à la sortie (W_s). Comme des différences ou des ratios sont calculés à partir de ces couples (Tableau 10), les variances réelles sont possiblement inférieures à celles calculées au Tableau 11.

Tableau 9 - Variables d'entrée nécessaires pour le calcul du phosphore excrété en élevage de poules.

*(Les valeurs en entrée sont un exemple pour une ferme donnée et variera d'une ferme à l'autre. L'écart-type intra-lot (%) est considéré fixe d'une ferme à l'autre).

Variable d'entrée (symbole pour les équations)	Valeur entrée	Écart-type intra- annuel	
		%	Valeur absolue
Nombre de poules à l'entrée (N_e)	25 000	0,5	125
Poids (kg) moyen des poules à l'entrée (W_e)	1,40	5,0	0,07
Poids (kg) moyen des poules mortes/perdues (W_m)	1,50	5,0	0,075
Nombre de poules à la sortie (N_s)	24 000	0,5	120
Poids (kg) moyen des poules à la sortie (W_s)	2,00	5,0	0,1
Nombre d'œufs produits (N_o)	8 000 000	1,0	80 000
Poids (kg) moyen des œufs produits (W_o)	0,06	5,0	0,003
Rétention en P poule (R_{Pp})	$4,0 \times 10^{-3}$	100,0	$4,0 \times 10^{-3}$
Rétention en P oeuf (R_{Po})	$1,8 \times 10^{-3}$	4,0	$7,2 \times 10^{-5}$
Quantité (kg) d'aliment servi au total (Q)	1 050 000	1,0	10 500
Teneur en phosphore de l'aliment (C_P)	$5,0 \times 10^{-3}$	11,0	$5,5 \times 10^{-4}$

Tableau 10 - Calcul du phosphore excrété annuel et de son incertitude pour un lot de poules.

Variable calculée (symbole pour les équations)	Valeur estimée	Variance estimée*
Nombre de poules mortes/perdues (N_m)	$N_e - N_s$	$\sigma^2(N_e) + \sigma^2(N_s)$
Gain de poids (kg) moyen mort/perdu (G_m)	$W_m - W_e$	$\sigma^2(W_m) + \sigma^2(W_e)$
Gain de poids (kg) moyen à la sortie (G_s)	$W_s - W_e$	$\sigma^2(W_s) + \sigma^2(W_e)$
Gain de poids (kg) total poules (G_{Tp})	$N_s G_s + N_m G_m$	$\sigma^2(G_s) N_s^2 + \sigma^2(N_s) G_s^2 + \sigma^2(G_m) N_m^2 + \sigma^2(N_m) G_m^2$
Gain de poids (kg) total œufs (G_{To})	$N_o W_o$	$\sigma^2(W_o) N_o^2 + \sigma^2(N_o) W_o^2$
P total (kg) servi (P_i)	$Q C_P$	$\sigma^2(C_P) Q^2 + \sigma^2(Q) C_P^2$
P total (kg) retenu poules (P_{Tp})	$G_{Tp} R_{Pp}$	$\sigma^2(R_{Pp}) G_{Tp}^2 + \sigma^2(G_{Tp}) R_{Pp}^2$
P total (kg) retenu œufs (P_{To})	$G_{To} R_{Po}$	$\sigma^2(R_{Po}) G_{To}^2 + \sigma^2(G_{To}) R_{Po}^2$
P total (kg) excrété (P_e)	$P_i - P_{Tp} - P_{To}$	$\sigma^2(P_i) + \sigma^2(P_{Tp}) + \sigma^2(P_{To})$

*La variance a été estimée par un développement limité de premier ordre en supposant l'indépendance entre les variables utilisées dans le calcul de la valeur estimée. Le terme $\sigma^2(X)$ réfère à la variance **absolue**, soit le carré de l'écart-type **absolu**, de la variable X.

Tableau 11 - Exemple de calcul du phosphore excrété un lot de poudeuses basé sur les valeurs d'entrée du Tableau 10

Variable calculée (symbole pour les équations)	Valeur estimée	Variance estimée	Coefficient de variation (%)
Nombre de poules mortes/perdues (N_m)	25 000 – 24 000 = 1000	$125^2 + 120^2 = 30\,025$	17,3
Gain de poids (kg) moyen mort/perdu (G_m)	1,50 – 1,40 = 0,10	$0,075^2 + 0,07^2 = 0,0105$	102,6
Gain de poids (kg) moyen à la sortie (G_s)	2,00 – 1,40 = 0,60	$0,1^2 + 0,07^2 = 0,0149$	20,3
Gain de poids (kg) total poules (G_{Tp})	$(24\,000 \cdot 0,6) +$ $(1000 \cdot 0,1) =$ 14 500	$(0,0149 \cdot 24\,000^2) + (120^2 \cdot 0,6^2) +$ $(0,0105 \cdot 1000^2) + (30\,025 \cdot 0,1^2) =$ $8,60 \times 10^6$	20,2
Gain de poids (kg) total œufs (G_{To})	$8 \times 10^6 \cdot 0,06 =$ $4,8 \times 10^5$	$(0,003^2 \cdot (8 \times 10^6)^2) + ((8 \times 10^4)^2 \cdot 0,06^2)$ $= 5,99 \times 10^8$	5,1
P total (kg) servi (P_i)	$1,05 \times 10^6 \cdot$ $0,005 =$ 5250	$((5,5 \times 10^{-4})^2 \cdot (1,05 \times 10^6)^2) +$ $(10\,500^2 \cdot 0,005^2) =$ $3,36 \times 10^5$	11,0
P total (kg) retenu poules (P_{Tp})	$14\,500 \cdot 0,004$ $=$ 58	$(0,004^2 \cdot 14\,500^2) +$ $(8,60 \times 10^6 \cdot 0,004^2) =$ 3502	102,0
P total (kg) retenu œufs (P_{To})	$4,8 \times 10^5 \cdot$ $0,0018 =$ 864	$((7,2 \times 10^{-5})^2 \cdot (4,8 \times 10^5)^2) +$ $(5,99 \times 10^8 \cdot 0,0018^2) =$ 3135	9,4
P total (kg) excrété (P_e)	5250 – 58 – 864 = 4328	$3,36 \times 10^5 + 3502 + 3135 = 3,43 \times 10^5$	13,5

5.7 Coefficient de rétention maximal

Afin de permettre aux utilisateurs du bilan alimentaire de valider les résultats du calcul, un critère de validation a été établi : il s'agit du coefficient de rétention maximal.

Le coefficient de rétention est le rapport entre les deux éléments de l'équation de base du calcul du bilan alimentaire qui, en rappel, est la suivante :

$$P \text{ servi} - P \text{ retenu} = P \text{ excrété}$$

Le coefficient de rétention se définit donc comme étant :

$$= P \text{ retenu} / P \text{ servis} \cdot 100$$

Le coefficient de rétention maximal représente la capacité maximale d'un élevage à retenir le phosphore servi. Pour établir les coefficients de rétention maximale, des coefficients ont été calculé à partir des données de l'ensemble des élevages ayant participé aux présents projets. Les coefficients des élevages de poulettes variaient entre 18 et 26 % alors que ceux des productions d'œufs de consommation variaient entre 14 et 21 %. Par la suite, les partenaires du projet ont été sollicités pour valider quels étaient les coefficients de rétention des élevages les plus performants de leurs entreprises. La consultation des partenaires a donc permis de confirmer les coefficients de rétention maximale (Tableau 12).

Tableau 12 - Pourcentage de rétention maximale par catégorie d'élevage

Catégories d'élevages	Rétention maximale (P retenu/P servi)
Élevage de poulettes	30 %
Production d'œufs de consommation	25 %

Ces valeurs signifient qu'un élevage de poulettes, par exemple, retient jusqu'à 30 % du phosphore servi, le reste étant excrété par les animaux. Les productions d'œufs de consommation ont des efficacités de rétention légèrement inférieure, soit 25 %.

Tel que mentionné précédemment, ces valeurs représentent des maximums signifiant donc que la majorité des élevages se situent en dessous de ces valeurs maximales, soit de l'ordre de 5 à 10 % de moins que la valeur maximale. Pour certains élevages, le coefficient de rétention peut même être en deçà de 10 % de la valeur maximale, d'où l'absence de valeurs minimales. En effet, une grande variabilité existe entre les élevages dont, entre autres, sur les apports en P total dans les aliments, qui tel que constaté précédemment, influencent directement la rétention. Par exemple, si un élevage utilise des sources peu digestibles de phosphore dans ces aliments alors qu'un autre élevage utilise des ingrédients plus digestibles, le premier élevage inclura de plus grande quantité de P dans ses aliments pour répondre au besoin en P digestible des poules. À l'opposé, le second élevage aura à inclure moins de phosphore dans ses aliments pour fournir la même quantité de P digestible. Ainsi, la première ferme aura un coefficient de rétention beaucoup plus faible que le second élevage.

Pour les élevages se situant aux valeurs de rétention maximale ou très près, cela signifie que ces élevages sont très performants soit d'un point de vue performance des animaux ou apport alimentaire. Pour les élevages ayant des coefficients supérieurs à ces coefficients maximaux, il sera important de bien valider les données utilisées et d'expliquer pourquoi cet élevage a un coefficient de rétention aussi élevé. Les critères à valider pour comprendre une rétention élevée sont : la composition nutritionnelle des aliments utilisés (apport en P total bas causé par une utilisation judicieuse d'ingrédients dont le phosphore est plus digestible et par l'utilisation de phytase et apport en Ca permettant une bonne rétention), les performances zootechniques des animaux (si l'élevage se situe dans les meilleurs pour ce qui est de la conversion alimentaire par exemple) et la gestion de l'alimentation pour une réduction du gaspillage (à quel point l'élevage est efficace à réduire le gaspillage).

6. Conclusion

L'objectif de ce projet était de valider la méthode du bilan alimentaire pour estimer les rejets de phosphore des élevages de poulettes et poules pondeuses. Plus spécifiquement, les principaux objectifs étaient 1) de valider les facteurs de rétention pour la poulette en croissance, la poule pondeuse et l'œuf, 2) Définir les paramètres les plus sensibles qui peuvent influencer le calcul du bilan alimentaire et établir des recommandations en lien avec la collecte de ces paramètres et 3) Établir un critère de validation des résultats du bilan alimentaire.

Les résultats du présent projet montrent que, considérant le contexte des élevages de poulettes et d'œufs de consommation québécois, le facteur de rétention en P des poulettes en croissance est de 6,6 g/kg de gain de poids, ce facteur variant peu entre les élevages. Pour les élevages de poules pondeuses, le facteur de rétention en P moyen était de 4 g/kg de gain, mais ce critère était beaucoup plus variable chez ce type d'animaux. Pour les œufs, le facteur de rétention était de 1.8 g/kg d'œuf frais.

L'analyse de sensibilité a, quant à elle, permis de mettre en évidence la sensibilité de la teneur en phosphore des aliments, paramètre nécessitant donc d'être basé sur des analyses de laboratoire. Le poids moyen des poulettes et des poules ainsi que les quantités d'aliments servis par période sont également des paramètres sensibles, c'est-à-dire que ces paramètres doivent être basés sur des valeurs provenant de pesées et non seulement estimer visuellement.

Finalement, des coefficients de rétention maximale, soit le rapport entre le phosphore retenu et le phosphore servi, ont été établis comme critère de validation du calcul. Le coefficient de rétention maximale pour les poulettes et les poules pondeuses est de 30 % et 25 % respectivement.

En conclusion, le bilan alimentaire est une méthode fiable pour établir la production de phosphore d'un lieu d'élevage de poulette ou de poule pondeuse. Les facteurs de rétention étant maintenant validés, il est impératif de bien établir la teneur en phosphore des aliments pour assurer une valeur de rejets en phosphore la plus exacte possible. De plus, ce projet a permis de constater que les apports de P seraient trop importants chez les poulettes démontrant ainsi que la méthode du bilan alimentaire peut également servir d'outil pour améliorer la durabilité des élevages de volailles.

7. Références

- Ahmed, N. M., K. A. Abdel Atti, K. M. Elamin, K. Y. Dafalla, H. E. E. Malik, and B. M. Dousa. 2013. Effect of dietary calcium sources on laying hens performance and egg quality. *J. Anim. Prod. Adv.* 3:226-231.
- An S. H., Kim D. W., and An B. K. 2016. Effects of Dietary Calcium Levels on Productive Performance, Eggshell Quality and Overall Calcium Status in Aged Laying Hens . *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 29:1477-1482.
- Cloutier et Lemelin, 2018, Le bilan alimentaire comme outil de performance agronomique pour estimer le phosphore produit dans un lieu d'élevage de poulettes ou de production d'œufs de consommation, Guide technique, 40 pp.
- R Chandrasekaran, R. S., P. K. Hopke, L. Rector, G. Allen et L. Lin., 2012. Chemical Composition of Wood Chips and Wood Pellets. *Energy & Fuels.* 26. 4932-4937.
- Ouyed A., 2005, Réduction des rejets de phosphore dans la litière des poulets de chair, mémoire de maîtrise, Université Laval.
- Cufadar, Y., O. Olgun, and A. O. Yildiz. 2011. The effect of dietary calcium concentration and particle size on performance, eggshell quality, bone mechanical properties and tibia mineral contents in moulted laying hens. *Br. Poult. Sci.* 52:761-768.
- England et al., 2012. Dual X-Ray absorptiometry analysis of broiler breeder eggs for prediction of egg components and evaluation of egg shell quality. *Poult. Sci.* 11:316-325
- Faridi A, Gitoe A and France J 2015. A meta-analysis of the effects of non-phytate phosphorus on broiler performance and tibia ash concentration. *Poultry Science* 94, 2753–2762.
- ITAVI, 2013. Estimation des rejets d'azote – phosphore - potassium calcium - cuivre – et zinc par les élevages avicoles, Mise à jour des références CORPEN volailles de 2006, 63 p.p.
- Jiang, S., L. Cui, C. Shi, X. Ke, J. Luo, and J. Hou. 2013. Effects of dietary energy and calcium levels on performance, egg shell quality and bone metabolism in hens. *Vet. J.* 198:252-258.
- Jiang, S., L. Cui, C. Shi, X. Ke, J. Luo, and J. Hou. 2013. Effects of dietary energy and calcium levels on performance, egg shell quality and bone metabolism in hens. *Vet. J.* 198:252-258.
- Keshavarz, K. and S. Nakajima. 1993. Re-evaluation of calcium and phosphorus requirements of laying hens for optimum performance and eggshell quality. *Poult. Sci.* 72:144-153.
- Kim W.K., Bloomfield S.A., Sugiyama T. and Ricke S.C. 2012. Concepts and methods for understanding bone metabolism in laying hens. *W. Poult Sci. J.*, Vol. 68:71-82
- Lambert W. Krimpen M., Star L. 2014. Phosphorus Requirement in Laying Hens Schothorst Feed Research B.V. <https://www.researchgate.net/publication/283274521>
- Létourneau-Montminy, M. P., Narcy, A., Magnin, M., Sauvart, D., Bernier, J. F., Pomar, C., and Jondreville, C. 2010. Meta-analysis of phosphorus utilisation by chicks: influence of dietary calcium and microbial phytase supply *Anim.* 10, 1844-1853.
- Rousseau, X., Létourneau-Montminy, M.P., Mème, N., Magnin, M., Nys, Y., and Narcy, A. 2012. Phosphorus utilization in finishing broiler chickens: effects of dietary calcium and microbial phytase, *Poult. Sci.*, 91:2829-2837.

- Safaa, H. M., M. P. Serrano., D. G. Valen Ahmed, N. M., K. A. Abdel Atti, K. M. Elamin, K. Y. Dafalla, H. E. E. Malik, and B. M. Dousa. 2013. Effect of dietary calcium sources on laying hens performance and egg quality. *J. Anim. Prod. Adv.* 3:226-231.
- Safaa, H. M., M. P. Serrano., D. G. Valencia, M. Frikha, E. Jimenez-Moreno, and G. G. Mateos. 2008. Productive performance and egg quality of brown egg-laying hens in the late phase of production as influenced by level and source of calcium in the diet. *Poult. Sci.* 87:2043-2051
- Taylor T. G. 1963. Calcium metabolism and the laying hen. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* Vol.14, Issue 9: 611-613.
- The Hague/Heerlen, 2012

Annexe 1: Valeurs de Phosphore et calcium analysées dans l'aliments dans des différentes fermes en moyenne sur tout le cycle

Poulettes

<i>N ferme</i>	<i>Teneur en P total analysé (g/kg)</i>				<i>Teneur en Ca total analysé (g/kg)</i>			
	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Écart-type</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Écart-type</i>
1	6,1	5,3	7,4	0,7	15,7	8,1	36,6	10,5
2	8,3	8,0	8,8	0,3	17,3	14,0	24,4	3,5
3	7,8	5,5	9,7	1,7	27,5	13,5	43,3	9,2
4	6,0	4,8	6,8	0,4	16,4	7,6	39,6	10,3
5	6,2	5,3	6,6	0,4	25,7	11,0	40,3	14,7
6	6,9	5,3	8,2	1,2	18,9	8,0	41,2	11,1
7	5,4	5,0	5,8	0,3	18,8	7,7	37,5	12,5
8	6,3	5,5	7,2	0,7	25,4	11,1	44,3	14,2
9	5,8	4,2	6,5	0,5	11,8	9,9	14,4	1,7
10	6,6	5,7	7,9	0,7	17,3	8,6	31,3	5,5
Moyenne	6,6	5,5	7,5	0,7	19,8	10,2	34,8	9,2

Poules pondeuses

<i>N ferme</i>	<i>Teneur en P total analysé (g/kg)</i>				<i>Teneur en Ca total analysé (g/kg)</i>			
	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Écart-type</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Écart-type</i>
<i>1</i>	5,6	4,8	6,4	0,5	51,1	46,5	56,9	4,1
<i>2</i>	5,9	5,0	6,6	0,3	37,0	29,0	55,0	5,5
<i>3</i>	5,6	4,3	7,0	0,6	41,1	31,3	56,2	7,9
<i>4</i>	6,4	6,1	6,7	0,2	45,7	38,8	58,2	6,2
<i>5</i>	4,4	4,3	4,5	0,1	74,5	54,6	96,2	14,5
<i>6</i>	5,5	4,5	7,2	0,6	46,8	27,6	67,5	10,2
<i>7</i>	5,2	4,8	5,8	0,3	49,5	35,9	64,5	7,40
<i>8</i>	6,9	5,4	8,0	0,8	46,0	32,2	52,6	6,9
<i>9</i>	4,8	4,5	5,0	0,3	39,0	25,3	46,3	9,1
<i>10</i>	5,4	5,3	6,7	0,5	42,6	39,5	45,0	2,5
<i>11</i>	5,3	4,2	6,9	0,5	35,4	22,1	42,7	6,7
<i>Moyenne</i>	5,5	4,8	6,4	0,4	45,9	34,7	57,7	7,4