

Modélisation dynamique de l'utilisation des nutriments et des besoins individuels chez la truie en lactation

Raphaël GAUTHIER (1), Christine LARGOUËT (2), Charlotte GAILLARD (1), Laetitia CLOUTIER (3), Frédéric GUAY (4),
Jean-Yves DOURMAD (1)

(1) PEGASE, Agrocampus Ouest, INRA, 35590, Saint-Gilles, France

(2) IRISA, Agrocampus Ouest, 35000 Rennes, France

(3) CDPQ, G1V4M6, Québec, Canada

(4) Université Laval, G1V0A6, Québec, Canada

raphael.gauthier@inra.fr

Modélisation dynamique de l'utilisation des nutriments et des besoins individuels chez la truie en lactation

La couverture des besoins nutritionnels pendant la lactation est très dépendante de la production laitière et de la consommation d'aliment, et varie largement entre les truies. En pratique, l'ajustement des apports alimentaires aux besoins individuels est difficile car les besoins sont établis à partir des performances moyennes du troupeau. L'acquisition de données à haut débit sur l'animal et son environnement permet d'envisager le développement de systèmes d'alimentation de précision. Le modèle développé combine les connaissances récentes sur l'utilisation des nutriments par la truie allaitante avec les données disponibles en élevage sur les truies à la mise-bas (rang, poids vif, épaisseur de lard dorsal) et sur leurs performances individuelles (ingestion journalière d'aliment de la truie, taille de portée et gain moyen quotidien des porcelets) pour estimer leurs besoins nutritionnels journaliers et par kg d'aliment. L'approche est testée sur une base de données constituée de 1450 lactations. Les effets de l'élevage (A, B), de la semaine de lactation (S1, S2 et S3+) et du rang de portée (P1, P2 et P3+) sont significatifs sur les performances des truies et sur leurs besoins journaliers en énergie métabolisable, lysine et phosphore digestibles. Le besoin moyen en lysine digestible par kg d'aliment est plus bas en S1 (6,4 g/kg), puis se stabilise en S2 (8,0 g/kg) et S3+ (7,8 g/kg). Il est plus bas pour les truies P3+ (6,7 g/kg) et P2 (7,3 g/kg) que P1 (8,3 g/kg) du fait de l'ingestion plus élevée des truies multipares. Les évolutions du besoin en phosphore selon la semaine et le rang sont comparables. L'utilisation des données d'élevage permet d'intégrer l'effet de la variabilité des performances sur les besoins nutritionnels individuels des truies allaitantes. En pratique, les besoins individuels pendant la lactation pourraient être mieux couverts par une alimentation de précision.

Dynamic modelling of nutrient use and individual requirements in lactating sows

Meeting nutritional requirements during lactation depends on milk yield and feed intake and varies among sows. In practice, meeting nutritional supplies and individual requirements is difficult because requirements are established at the herd scale from average performance. Acquiring data on sows and their environment at high-throughput allows the development of new precision feeding systems. The model developed combines current knowledge about nutrient use during lactation with on-farm data available on lactating sows at farrowing (parity, body weight, backfat thickness) and on their individual performances (litter size, average daily gain of the litter, sow daily feed intake) to estimate nutritional requirements per day and per kg of feed. The approach was tested on a database of 1450 lactations. The effect of farm (A, B), week of lactation (W1, W2 and W3+) and parity (P1, P2 and P3+) were significant on sow performances and on their daily requirements for metabolizable energy, digestible lysine and phosphorus. The average required dietary concentration of digestible lysine was low at W1 (6.4 g/kg) and then stabilised at W2 (8.0 g/kg) and W3+ (7.8 g/kg). It was lower for P3+ (6.7 g/kg) and P2 sows (7.3 g/kg) than P1 sows (8.3 g/kg) due to the higher feed intake of multiparous sows. The changes in digestible phosphorus requirements according to week of lactation and parity were similar. The use of on-farm data allows to integrate the effect of performance variability on individual requirements in lactating sows. In practice, individual requirements during lactation could be better met with a precision feeding strategy.

INTRODUCTION

Les besoins nutritionnels des truies en lactation dépendent principalement de la production laitière et du niveau d'ingestion, et varient largement entre les individus (NRC, 2012). En pratique cependant, un même aliment de lactation est généralement distribué à toutes les truies du troupeau et l'ingestion de nutriments est souvent insuffisante pour couvrir les besoins nutritionnels liés à la production de lait (Noblet *et al.*, 1990), particulièrement ceux des truies primipares. Les truies subissant un déficit énergétique peuvent dans une certaine mesure maintenir leur production laitière en mobilisant l'énergie contenue dans leurs réserves corporelles (Noblet et Etienne, 1986), tandis que la production laitière apparaît plus sensible aux déficits en acides aminés (Dourmad *et al.*, 1998; NRC, 2012), ce qui pénalise les performances ultérieures de reproduction de la truie (Trottier *et al.*, 2015). A l'inverse, les truies recevant une ration trop riche par rapport à leurs besoins excrètent de plus grandes quantités d'azote et de phosphore, ce qui accroît les impacts environnementaux et le coût alimentaire.

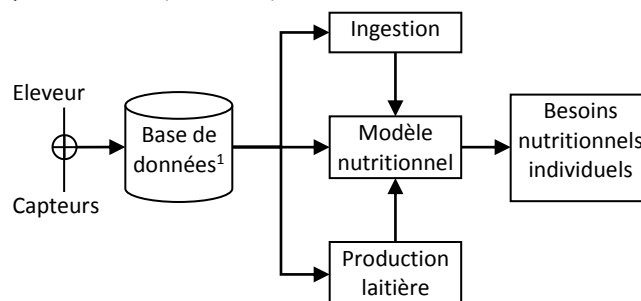
Bien que les besoins nutritionnels semblent très variables compte tenu de la forte variabilité de la production laitière et de la consommation d'aliment, les besoins nutritionnels en lactation sont établis à l'échelle d'un groupe de truies, ou par rang de portée pour une truie moyenne représentative du troupeau (Dourmad *et al.*, 2008). La variabilité individuelle des performances au sein du troupeau n'est donc généralement pas prise en compte, ou seulement par l'utilisation de marges de sécurité (NRC, 2012). Le développement de dispositifs d'alimentation innovants capables de distribuer simultanément plusieurs aliments, ainsi que la mise au point de nouvelles technologies pour phénotyper à haut-débit les truies dans leur environnement offrent depuis peu de nouvelles opportunités pour mieux adapter les apports nutritionnels aux performances et aux besoins de chaque individu. Les stratégies d'alimentation de précision ont démontré leur intérêt chez le porc en croissance (Cloutier *et al.*, 2015) et la truie en gestation (Dourmad *et al.*, 2017) mais cette démarche n'a pas encore été évaluée chez la truie en lactation. La mise au point d'une telle stratégie en lactation nécessite en premier lieu de modéliser l'utilisation des nutriments et son évolution pour chaque truie. Le modèle présenté vise donc à explorer la variabilité des besoins individuels en énergie, acides aminés et phosphore des truies pendant la lactation, par jour et par kg d'aliment.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Approche générale

L'originalité de l'approche proposée repose sur la combinaison des connaissances actuelles sur l'utilisation des nutriments par les truies avec le flux des données produites en élevage au cours de la lactation (Figure 1). Ces données concernent (i) des événements liés à la mise-bas (date, rang de portée, poids vif (PV) et épaisseur de lard dorsal (ELD) des truies, taille et poids de la portée à la mise-bas et après homogénéisation), (ii) des événements survenant pendant la lactation (adoptions, mortalité des porcelets, consommations journalières de la truie) et (iii) des événements propres au sevrage (date, taille et poids de portée). En pratique, ces données peuvent être enregistrées par l'éleveur ou par des capteurs.

Un module mécaniste reposant principalement sur le modèle InraPorc (Dourmad *et al.*, 2008) est utilisé quotidiennement pour calculer les besoins nutritionnels et prédire les changements de réserves corporelles de la truie, en fonction de la production laitière estimée et de la consommation d'aliment mesurée. Ce module calcule chaque jour les dépenses d'entretien et de production laitière pour chaque truie en fonction de ses propres caractéristiques et performances (Tableau 1).



¹Base contenant le rang de portée, le poids vif de la truie, la taille et le GMQ de la portée, et les ingestions journalières de la truie

Figure 1. Utilisation des données d'élevage pour la prédiction des besoins nutritionnels individuels et journaliers de lactation

1.2. Détermination des besoins nutritionnels

1.2.1. Utilisation des nutriments et des constituants organiques

Les nutriments couvrent les besoins d'entretien et de production laitière. L'énergie et les acides aminés fournis par l'utérus à l'organisme lors de la régression *post-partum* sont utilisés pour la synthèse du lait (Equations 1 et 6). Les réserves corporelles sont utilisées comme sources substantielles d'énergie et d'acides aminés en cas de déficits nutritionnels.

1.2.2. Production laitière

Selon l'approche factorielle, les besoins nutritionnels des truies en lactation sont généralement établis en fonction de la quantité de composants exportés dans le lait (Noblet et Etienne, 1986). La détermination de la courbe de lactation est donc essentielle pour décrire les quantités journalières de nutriments requis pour la synthèse du lait. L'allure de la courbe de lactation obtenue par Hansen *et al.* (2012) est utilisée (Equation 16). Dans leur travail, l'équation de Wood (1967), largement utilisée pour décrire la production laitière des vaches et des truies, est paramétrée à partir d'une méta-analyse, comme le logarithme de la production laitière aux jours 5, 20 et 30 (Hansen *et al.*, 2012). L'évolution de la production laitière au cours de la lactation est représentée pour chaque truie par un coefficient ($\alpha(t)$) intégrant l'effet de la taille de la portée et de sa croissance (Equation 17).

1.2.3. Besoins en énergie métabolisable (EM)

Pendant la lactation, le besoin énergétique d'entretien est estimé à 460 kJ EM/kg^{0.75} (Noblet *et al.*, 1990) (Equation 2). L'efficacité de l'EM pour la production laitière (k_{lait}) est évaluée à 72% tandis que l'énergie des réserves corporelles mobilisées en cas de déficit est utilisée avec une plus forte efficacité ($k_{\text{rm}} = 88\%$) (Noblet et Etienne, 1987). L'énergie du lait est calculée pour chaque truie à partir du gain moyen quotidien de la portée (GMQP) et de la taille de la portée (Noblet et Etienne, 1989) (Equation 3). Cette équation est combinée avec le facteur de production laitière ($\alpha(t)$) pour estimer la quantité journalière d'énergie exportée dans le lait. Dans notre modèle, l'énergie fournie lors de la régression utérine *post-partum*

Tableau 1 – Récapitulatif des différentes équations décrivant l'utilisation des nutriments par la truie en lactation¹

Utilisation de l'énergie métabolisable (EM)	$EM = EM_e + E_{lait} / k_{lait} - ER_m / k_{rl} - E_U \times k_{rl} / k_{lait}$	[1]
EM d'entretien ² , kJ/j	$EM_e(t) = 460 \times PV^{0,75}(t)$	[2]
Efficacité d'utilisation de l'EM pour le lait ³	$k_{lait} = 0,72$	
Efficacité de l'énergie des réserves pour le lait ³	$k_{rl} = 0,88$	
Energie exportée dans le lait ^{4,11} , kJ/j	$E_{lait}(t) = (20,6 \times GMQP - 376 \times TP) \times \alpha(t)$	[3]
Energie contenue dans la paroi utérine ⁵ , kJ	$\log(E_U) = 9,853 - 3,098 \times \exp(-0,006915 \times 115) + 0,06542 \times n$	[4]
Energie fournie par la régression utérine, kJ/j	$E_U(t) = \log(E_U) \times \exp(-\log(2) / \lambda \times (t-1)) - \log(E_U) \times \exp(-\log(2) / \lambda \times t)$	[5]
Utilisation des acides aminés (AA)	$AA = AA_e + (Prot_{lait} \times AA_{lait} / k_{AA}) - (AA_U + AA_m) \times k_{AA}$	[6]
AA d'entretien, g/j	$AA_e(t) = ((AA_d + AA_t) \times PV^{0,75}(t)) + AA_{end} \times MSI(t)$	[7]
Protéines exportées dans le lait ^{4,11} , g/j	$Prot_{lait}(t) = (0,0257 \times GMQP + 0,42 \times TP) \times 6,38 \times \alpha(t)$	[8]
Protéines contenues dans la paroi utérine ⁵ , g	$\log(Prot_U) = 7,653 - 4,207 \times \exp(-0,004477 \times 115) + 0,07239 \times n$	[9]
Protéines fournies par la régression utérine, g/j	$Prot_U(t) = Prot_U \times \exp(-\log(2) / \lambda \times (t-1)) - Prot_U \times \exp(-\log(2) / \lambda \times t)$	[10]
Bilan en azote associé à la lysine digestible ⁶ , g/j	$BN_{lys}(t) = -14,2 + 1,335 \times Lys_{Dis} - 0,629 \times Prot_{lait}(t) / 6,38 + Prot_U(t) \times 0,065$	[11]
Utilisation du phosphore⁷ (P)	$P_{bes}(t) = P_e(t) + P_{lait}(t) / 0,98$	[12]
P d'entretien ⁸ , g/j	$P_e(t) = 0,01 \times PV(t)$	[13]
P exporté dans le lait ⁸ , g/j	$P_{lait}(t) = Prot_{lait}(t) \times 1,55 / 50$	[14]
Demi-vie de la régression utérine^{9,10}, j	$\lambda = 6,18$	[15]
Production laitière¹¹, kg/j	$PL(t) = a \times t^b \times \exp(-c \times t)$	[16]
Facteur de production laitière ¹¹	$\alpha(t) = PL(t) / PL_{moyen}$ $a = \exp(1/3 \times (-ly_{20} \times \log(128/27) - 3 \times \log(20) \times ly_{30} + 5 \times \log(20) \times ly_{20} - 2 \times \log(20) \times ly_5 + 4 \times ly_5 \times \log(128/27) + 12 \times ly_{30} \times \log(5) - 20 \times \log(5) \times ly_{20} + 8 \times \log(5) \times ly_5) / \log(128/27))$ $b = -(3 \times ly_{30} - 5 \times ly_{20} + 2 \times ly_5) / \log(128/27)$ $c = 1/15 \times (ly_5 \times \log(128/27) - ly_{20} \times \log(128/27) - 3 \times \log(20) \times ly_{30} + 5 \times \log(20) \times ly_{20} - 2 \times \log(20) \times ly_5 + 3 \times ly_{30} \times \log(5) - 5 \times \log(5) \times ly_{20} + 2 \times \log(5) \times ly_5) / \log(128/27)$ $ly_5 = 1,93 + 0,07 \times (TP - 9,5) + 0,04 \times (GMQP - 2,05) - 0,34$ $ly_{20} = 2,23 + 0,05 \times (TP - 9,5) + 0,23 \times (GMQP - 2,05) - 0,22$ $ly_{30} = 2,15 + 0,02 \times (TP - 9,5) + 0,31 \times (GMQP - 2,05) - 0,05$	[17]
Composition chimique des truies⁶	Lipides (t), kg = $-26,4 + 0,221 \times PVV(t) + 1,331 \times ELD(t)$	[18]
	Protéines (t), kg = $2,28 + 0,178 \times PVV(t) + 0,333 \times ELD(t)$	[19]
	Energie (t), MJ = $-1074 + 13,65 \times PVV(t) + 45,94 \times ELD(t)$	[20]

¹EM = utilisation de l'énergie métabolisable, EM_e = EM d'entretien (kJ/j), E_{lait} = Energie du lait (kJ/j), k_{lait} = efficacité de l'EM pour la production laitière, ER_m = Energie mobilisée dans les tissus maternels pour la synthèse du lait (kJ/j), k_{rl} = efficacité d'utilisation de l'énergie des réserves pour la production laitière, E_U = Energie fournie par l'utérus (kJ/j), t = stade de lactation (j), PV = poids vif (kg), $GMQP$ = gain moyen quotidien de la portée (g), TP = taille de la portée (nombre de porcelets), n = nombre de fœtus, $\alpha(t)$ = facteur de production laitière par truie et par jour, AA = utilisation des acides aminés digestibles (g/j), AA_e = AA d'entretien (g/j), $Prot_{lait}$ = protéines exportées dans le lait (g/j), AA_{lait} = composition en AA du lait (g/j), k_{AA} = efficacité des AA pour la production laitière, AA_U = AA fournis par l'utérus (g/j), AA_m = AA mobilisés dans les tissus maternels (g/j), AA_d = pertes par les téguments en AA (g/j), AA_t = pertes en AA par turnover (g/j), AA_{end} = pertes basales endogènes intestinales d'AA (g/kg MSI), MSI = matière sèche ingérée (kg), $Prot_U$ = protéines fournies par l'utérus (g/j), BN_{lys} = bilan azoté associé à la lysine digestible (g/j), Lys_{Dis} = ingestion de lysine digestible iléale standardisée (g/j), P_{bes} = besoin en phosphore (g/j), P_e = phosphore d'entretien (g/j), P_{lait} = phosphore exporté dans le lait (g/j), λ = demi-vie de l'utérus en régression (j), PL = production laitière (kg), PL_{moyen} = production laitière moyenne de la truie au cours de la lactation (kg/j), les paramètres ly_5 , ly_{20} et ly_{30} représentent le logarithme naturel de la production laitière aux jours 5, 20 et 30 de lactation, PVV = poids vif vide (kg), ELD = épaisseur de lard dorsal au site P₂ (mm).

²Noblet et al. (1990), ³Noblet et Etienne (1987), ⁴Noblet et Etienne (1989), ⁵Noblet (1990), ⁶Dourmad et al. (1998), ⁷Bikker et Blok (2017), ⁸Jondreville et Dourmad (2005), ⁹Palmer et al. (1965), ¹⁰Graves et al. (1967), ¹¹Hansen et al. (2012).

contribue aux apports totaux en énergie avec la même efficacité que l'énergie des réserves corporelles (k_{rl}). L'énergie de la paroi utérine au 115^{ème} jour de gestation est estimée à partir du nombre de fœtus (Equation 4) (Noblet, 1990). La demi-vie λ de l'utérus est évaluée à 6,18 jours à partir des études de Palmer et al. (1965) et de Graves et al. (1967) (Constante 15). La quantité journalière d'énergie fournie à l'organisme par l'utérus est ensuite calculée à partir du contenu énergétique de l'utérus à la mise-bas et du taux de régression (Equation 5).

1.2.4. Besoins en acides aminés (AA) digestibles au niveau iléal

Les besoins d'entretien et de production sont calculés pour tous les acides aminés essentiels, en tenant compte de la contribution de l'utérus (Equation 6). Les besoins d'entretien sont calculés comme la somme des pertes par les téguments (AA_d ; Moughan, 1999) et des pertes par renouvellement minimal des protéines (AA_t ; Moughan, 1999), ainsi que des pertes basales endogènes (AA_{end} ; NRC, 2012; Equation 7). Les pertes AA_t reflètent le seuil minimal de catabolisme des acides aminés par l'organisme (NRC, 2012). Les pertes AA_{end}

sont issues des protéines sécrétées dans la lumière intestinale et non réabsorbées par la truie. Elles dépendent de la quantité de matière sèche ingérée (Sauvant et al., 2004). Les besoins de chaque acide aminé pour la production de lait sont calculés chaque jour à partir de la quantité de protéines exportées dans le lait (Equation 8), de la composition en acides aminés du lait (NRC, 2012) et d'une efficacité d'utilisation marginale maximale (k_{AA}). L'efficacité maximale de l'utilisation des acides aminés digestibles est calculée à partir du profil en acides aminés de la protéine idéale selon l'approche de van Milgen et al. (2008), en faisant l'hypothèse que l'efficacité maximale de la lysine est de 0,78 (Dourmad et al., 1998; Jones et Stahly, 1999). Les valeurs k_{AA} sont 0,78, 0,70, 0,61, 0,76, 0,74, 0,77, 0,81, 0,82, 0,74, 0,66, 0,80, et 0,78 respectivement pour les acides aminés lysine, méthionine, cystine, tryptophane, thréonine, phénylalanine, tyrosine, leucine, isoleucine, valine, histidine, et arginine. Le profil en acides aminés de la protéine idéale est supposé correspondre à celui d'une truie pesant 180 kg, consommant 5,5 kg/j d'aliment, avec une croissance de portée de 2200 g/j et une taille de portée de 11 porcelets.

Comme pour l'énergie, la quantité journalière de protéines fournies à l'organisme par l'utérus est calculée à partir du contenu protéique de la paroi utérine à la mise-bas et du taux de régression utérine (Equations 9 et 10, et constante 15). Les acides aminés fournis par l'utérus sont utilisés à des fins de production laitière avec les mêmes efficacités k_{AA} d'utilisation que ceux apportés par l'aliment. Pour chaque acide aminé, le bilan entre les besoins et les apports est évalué, et le bilan minimal est utilisé comme base d'estimation de la mobilisation des réserves corporelles protéiques.

1.2.5. Besoins en phosphore (P) digestible

Les besoins d'entretien en P digestible sont déterminés à partir de la revue bibliographique de Bikker et Blok (2017) et s'élèvent à 10 mg/kg^{0,75}. La quantité de P du lait est estimée à partir de la teneur en protéines en considérant le ratio P/protéines égal à 0,031 (Jondreville et Dourmad, 2005 ; NRC, 2012). Comme proposé par Bikker et Blok (2017), l'efficacité d'utilisation de P pour le lait est de 0,98 (Equation 12).

1.2.6. Paramètres corporels et constituants chimiques

Le PV et l'ELD à la mise-bas sont utilisés pour déterminer la taille initiale des compartiments lipidiques, énergétiques et protéiques de chaque truie (Dourmad *et al.*, 1998) (Equations 18, 19, 20). Puis, les évolutions de PV et d'ELD au cours de la lactation sont simulées à partir des quantités d'énergie (ER_m) et de protéines (BN) mobilisées afin d'adapter le calcul factoriel des besoins d'entretien.

1.3. Description de la base de données

Une base de données issue de deux fermes expérimentales est utilisée pour représenter la variabilité des performances des truies et de leurs portées. Les deux jeux de données contiennent des informations de même nature sur le rang de portée et l'état corporel des truies à la mise-bas (i.e., PV, ELD) et leurs consommations journalières d'aliment. Les tailles de portées ont été enregistrées à la naissance, après homogénéisation dans les deux premiers jours de lactation et au sevrage. Tous les événements affectant la taille de portée durant la lactation (mortalité de porcelets ou adoptions) ont également été enregistrés, ainsi que les dates de mise-bas et de sevrage. Le jeu de données (Elevage A) fourni par le CDPQ (Québec) contient les données de 633 lactations avec un rang de portée moyen de 3,9 ($\pm 2,2$) et un poids vif moyen à la mise-bas de 241 (± 33) kg. La taille de portée est en moyenne de 11,6 ($\pm 1,6$) porcelets avec un GMQP de 2569 (± 343) g. La durée de lactation est de 25,2 ($\pm 2,7$) jours. Le jeu de données (Elevage B) fourni par l'Université Laval (Québec) contient les données de 817 lactations avec un rang de portée moyen de 1,9 ($\pm 0,8$) et un poids vif moyen à la mise-bas de 218 ($\pm 24,7$) kg. La taille de portée est en moyenne de 11,9 ($\pm 1,2$) porcelets avec un GMQP de 2633 (± 554) g. La lactation dure moins longtemps, environ 18,6 ($\pm 2,6$) jours. Dans les deux jeux de données, les truies sont alimentées *ad libitum* par des automates de distribution (Gestal, JYGA Technologies, Québec, CA) capables d'enregistrer les consommations journalières et le comportement alimentaire de chaque truie.

1.4. Calculs et analyses statistiques

Le modèle informatique de calcul est développé en langage Python. Il simule chaque jour les performances des truies en utilisant toutes les données de la base, et calcule les besoins en énergie, acides aminés et minéraux. La procédure GLM (SAS v9.4, SAS Inst. Cary, NC) est utilisée pour l'analyse statistique

de l'ensemble des variables mesurées ou simulées en tenant compte des effets fixes de l'élevage (A ; B), du stade de lactation (S1 : semaine 1 ; S2 : semaine 2 ; S3+ : semaine 3 et +), et du rang de portée (P1 : 1 ; P2 : 2 ; P3+ : 3 et +) et d'un effet aléatoire de la truie en lactation. Les besoins en lysine et phosphore digestibles par kg d'aliment sont calculés pour chaque stade de lactation à partir des moyennes des besoins journaliers et des consommations sur la période étudiée.

2. RESULTATS

2.1. Ingestion

L'effet de l'élevage, de la semaine de lactation et du rang de portée sont significatifs sur la consommation alimentaire moyenne, ainsi que sur les quantités d'énergie et d'azote exportées dans le lait ($P < 0,001$; Tableau 2). L'ingestion des truies est plus élevée dans l'élevage A que dans l'élevage B, avec des consommations moyennes respectives de 6,54 et 5,84 kg/j. L'ingestion est en moyenne plus faible au cours de S1 (4,48 kg/j), augmente au cours de S2 (6,59 kg/j) puis S3+ (7,42 kg/j). La consommation augmente aussi avec le rang de portée des truies, de 5,19 kg/j pour les truies P1 à 6,75 kg/j pour les truies P3+.

2.2. Energie métabolisable

La quantité moyenne d'énergie exportée dans le lait est plus élevée dans l'élevage B que dans l'élevage A, avec respectivement 49,8 et 48,6 MJ/j. Le besoin journalier en EM est fortement corrélé au besoin de production laitière (0,92 ; $P < 0,001$) et dépend du besoin d'entretien. Ainsi, pour un besoin de production plus élevé mais un poids inférieur, le besoin en EM dans l'élevage B (94,1 MJ/j) est plus faible que dans l'élevage A (94,7 MJ/j). L'exportation d'énergie dans le lait est la plus faible au cours de S1 (31,7 MJ/j), intermédiaire au cours de S2 (56,8 MJ/j) et la plus élevée au cours de S3+ (60,8 MJ/j ; $P < 0,001$). Le besoin en EM augmente de manière significative avec le stade de lactation, de 69,7 MJ/j (S1) à plus de 100 MJ/j (S2 et S3+ ; $P < 0,001$). L'exportation d'énergie dans le lait est la plus forte pour les truies P2 avec 51,1 MJ/j. Le besoin en EM est le plus élevé pour les truies P3+ (96,7 MJ/j), et le plus faible pour les truies P1 (89,1 MJ/j ; $P < 0,001$). Le bilan énergétique, moyen calculé pour une ration contenant 13,0 MJ EM/kg, est négatif dans les deux élevages, ainsi que pour chaque semaine et chaque rang de portée. En moyenne le bilan énergétique est négatif lorsque les truies consomment moins de 7,51 kg/j ($P < 0,001$). Le déficit en EM est plus important pour les truies de l'élevage B, -18,2 contre -9,6 MJ/j pour les truies de l'élevage A. Le déficit le plus fort est atteint au cours de S2 (-19,1 MJ/j ; $P < 0,001$). Le déficit est également plus prononcé pour les truies P1 (-21,7 MJ/j) que P2 et P3+, avec des déficits respectifs de -14,7 et -9,0 MJ/j ($P < 0,001$).

2.3. Azote et lysine digestible

Tout comme pour l'énergie, l'exportation moyenne d'azote dans le lait est plus forte dans l'élevage B que dans l'élevage A (respectivement 72,6 et 70,9 g N/j ; Figure 2). L'exportation d'azote augmente avec la semaine de lactation, de 46,5 g N/j pour S1 à 88,3 g N/j pour S3+. L'exportation d'azote dans le lait est plus élevée pour les truies P2, avec 74,2 g N/j.

Le besoin moyen en lysine digestible est de 43,1 g/j (Elevage A) et de 43,6 g/j (Elevage B ; $P < 0,01$). Il augmente fortement entre S1 et S2, avec des valeurs respectives de 27,5 et 49,9 g/j, puis plafonne à 53,9 g/j au cours de S3+ ($P < 0,001$). Les truies

P2 présentent le besoin moyen le plus élevé (44,7 g/j ; $P < 0,001$). Le besoin moyen en lysine par kg d'aliment est supérieur dans l'élevage B (7,8 g/kg) par rapport à l'élevage A (6,8 g/kg ; $P < 0,001$). La teneur en lysine nécessaire pour satisfaire les besoins de 80% des truies du troupeau s'élève à 7,6 g/kg dans l'élevage A et à 9,4 g/kg dans l'élevage B. La concentration nécessaire pour couvrir les besoins de 80% de la population est donc supérieure au besoin moyen de respectivement 11,8% et 20,5% pour les élevages A et B. Le besoin moyen en lysine par kg d'aliment est plus faible au cours de S1 (6,4 g/kg) puis augmente au cours de S2 (8,0 g/kg ; $P < 0,001$) et reste stable par la suite (7,8 g/kg). Le besoin est satisfait pour 80% des truies avec des concentrations en lysine de 7,6, 9,5 et 9,2 g/kg, respectivement au cours de S1, S2 et S3+ (Figure 3a). Le rang de portée affecte aussi le besoin en lysine digestible par kg d'aliment ($P < 0,001$), avec un besoin moyen de 8,3, 7,3 et 6,7 g/kg respectivement pour les truies P1, P2 et P3+. Les concentrations permettant de satisfaire les besoins de 80% des effectifs par rang de portée s'élèvent à 9,8 (P1), 8,6 (P2) et 7,6 g/kg (P3+) (Figure 3b).

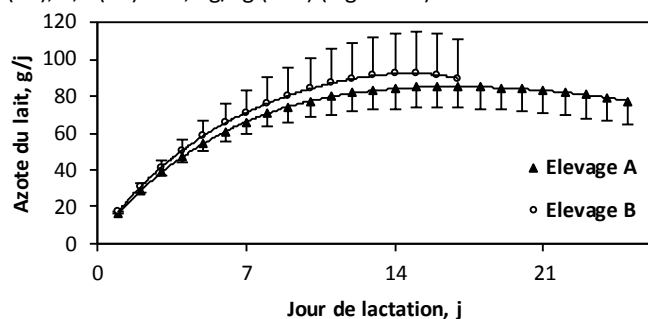


Figure 2 – Effet du stade de lactation sur la quantité d'azote exportée dans le lait pour chaque élevage

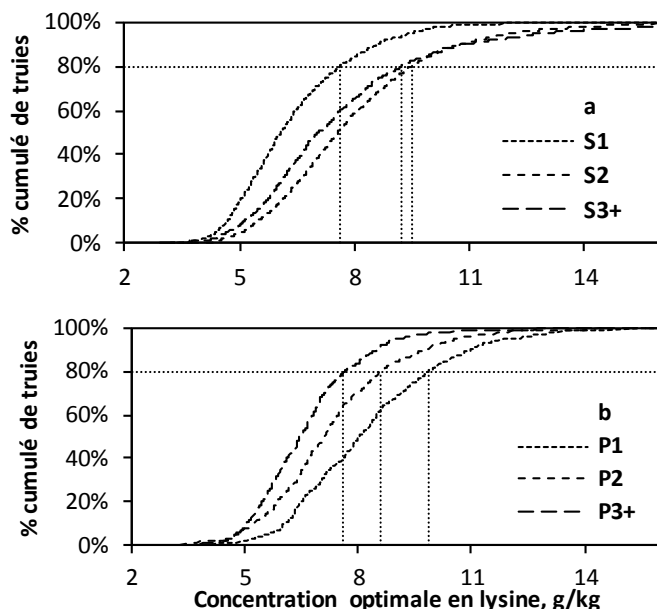


Figure 3 – Effet de la concentration en lysine de l'aliment sur la couverture du besoin des truies en fonction (a) de la semaine de lactation et (b) du rang de portée

2.4. Phosphore digestible

Le besoin journalier en P digestible est plus élevé ($P = 0,003$) dans l'élevage B (16,8 g/j) que dans l'élevage A (16,7 g/j). Il augmente au cours de la lactation, de 11,6 g/j (S1) à 18,9 g/j (S2) puis 20,0 g/j (S3+ ; $P < 0,001$). Il est plus élevé pour les truies P2 (17,2 g/j) que pour les truies P1 (16,0 g/j) et P3+ (17,0 g/j) ($P < 0,001$). Le besoin moyen en P digestible par kg

d'aliment est plus élevé dans l'élevage B (3,0 g/kg) que dans l'élevage A (2,6 g/kg ; $P < 0,001$). La teneur en P nécessaire pour satisfaire les besoins de 80% des truies du troupeau s'élève à 2,9 g/kg dans l'élevage A et à 3,6 g/kg dans l'élevage B. La concentration nécessaire pour couvrir les besoins de 80% de la population est donc supérieure au besoin moyen de, respectivement, 11,5% et 20% pour les élevages A et B. Le besoin par kg d'aliment augmente entre S1 et S2 de 2,7 à 3,0 g/kg, le besoin en S3+ étant intermédiaire (2,9 g/kg ; $P < 0,001$). Le besoin est satisfait pour 80% des truies avec des concentrations en phosphore de 3,2, 3,6 et 3,5 g/kg, respectivement au cours de S1, S2 et S3+. Le besoin le plus élevé est obtenu pour les truies P1 (3,2 g/kg), il diminue à 2,8 et à 2,6 g/kg, respectivement pour les truies P2 et P3+ ($P < 0,001$). Les concentrations permettant de satisfaire les besoins de 80% des effectifs au sein de chaque rang de portée s'élèvent à 3,8 (P1), 3,3 (P2) et 3,0 (P3+) g/kg.

3. DISCUSSION

Le modèle s'appuie sur des connaissances récentes en matière d'utilisation des nutriments. La courbe de production laitière utilisée (Hansen *et al.*, 2012) entraîne des besoins plus faibles en début de lactation et une évolution plus rapide que celle utilisée dans le logiciel InraPorc (Dourmad *et al.*, 2008). La prise en compte des constituants organiques fournis par l'utérus contribue à réduire la quantité de nutriments devant être apportée par l'alimentation ou mobilisée à partir des réserves, notamment au cours de la première semaine de lactation. L'utilisation de rendements spécifiques pour chaque acide aminé permet de moduler l'équilibre entre les acides aminés selon le niveau de production.

Le modèle utilise en entrée les caractéristiques et les performances individuelles des truies ce qui permet de formuler des recommandations tenant compte du niveau moyen des performances de chaque élevage. Ainsi la quantité de nutriments exportés dans le lait dans l'élevage B est légèrement supérieure à celle de l'élevage A ; cela n'affecte pas les besoins journaliers en EM ou en lysine du fait d'un poids vif et donc de besoins d'entretien plus faibles. En revanche, le déficit énergétique et les besoins en lysine et phosphore digestibles par kg d'aliment de l'élevage B sont plus élevés que dans l'élevage A, du fait de la plus faible consommation des truies. Cela renforce l'intérêt d'utiliser des données spécifiques à chaque élevage.

Les besoins journaliers de chaque nutriment augmentent au cours des semaines de lactation, ce qui est en accord avec les résultats de Strathe *et al.* (2015). Toutefois, l'effet de la semaine de lactation semble plus marqué dans notre étude vraisemblablement en raison de la prise en compte de la contribution de la régression utérine. Pour la même raison et aussi en raison de l'allure de la courbe de production laitière, l'évolution des besoins est aussi plus marquée que dans le modèle InraPorc. Il en résulte que les besoins en lysine et en P digestibles exprimés par kg d'aliment sont plus faibles en première semaine de lactation et plus élevés par la suite. Comme le suggèrent Strathe *et al.* (2015), cette évolution est à mettre en relation avec une augmentation de la production de lait plus rapide que l'accroissement de la capacité d'ingestion.

Pour des niveaux de performances proches, les besoins en lysine digestible proposés par le NRC (2012) sont de 45,7 contre 41,8 g/j dans notre étude pour les truies P1 et 48,9 g/j pour les truies multipares contre respectivement 44,7 et

Tableau 2 – Influence de l'élevage (E), de la semaine de lactation (S) et du rang de portée (P) sur les performances, les besoins en énergie métabolisable (EM), lysine digestible (Lys_{Dig}) et phosphore digestible (P_{Dig})¹

	Elevage		Semaine de lactation			Rang de portée			P-value ¹			
	A	B	S1	S2	S3+	P1	P2	P3+	ETR ²	E	S	P
Nombre de truies	633	817	1450	1450	1397	454	379	617				
Ingestion, kg/j	6,54	5,84	4,48 ^a	6,59 ^b	7,42 ^c	5,19 ^a	6,30 ^b	6,75 ^c	0,98	***	***	***
Energie du lait, MJ/j	48,6	49,8	31,70 ^a	56,8 ^b	60,8 ^c	47,5 ^a	51,1 ^c	49,4 ^b	5,4	***	***	***
Besoin EM, MJ/j	94,7	94,1	69,7 ^a	104,8 ^b	110,4 ^c	89,1 ^a	96,6 ^b	96,7 ^b	7,3	**	***	***
Bilan EM, MJ/j	-9,6	-18,2	-11,5 ^a	-19,1 ^c	-14,0 ^b	-21,7 ^a	-14,7 ^b	-9,0 ^c	13,9	***	***	***
Azote du lait, g N/j	70,9	72,6	46,5 ^a	82,7 ^b	88,3 ^c	69,8 ^a	74,2 ^c	71,9 ^b	7,3	***	***	***
Besoin Lys _{Dig} moyen, g/j	43,1	43,6	27,5 ^a	49,9 ^b	53,9 ^c	41,8 ^a	44,7 ^c	43,7 ^b	4,2	**	***	***
Besoin Lys _{Dig} moyen, g/kg	6,8	7,8	6,4 ^a	8,0 ^b	7,8 ^b	8,3 ^a	7,3 ^b	6,7 ^c	1,7	***	***	***
Besoin P _{Dig} moyen, g/j	16,7	16,8	11,6 ^a	18,9 ^b	20,0 ^c	16,0 ^a	17,2 ^c	17,0 ^b	1,5	**	***	***
Besoin P _{Dig} moyen, g/kg	2,6	3,0	2,7 ^a	3,0 ^c	2,9 ^b	3,2 ^a	2,8 ^b	2,6 ^c	0,7	***	***	***

¹ Modèle linéaire généralisé à effets fixes (élevage, semaine, rang) et aléatoire (lactation de truie) **: P < 0,01 ; *** : P < 0,001 ; ² ETR : Ecart-type résiduel

43,7 g/j pour les truies P2 et P3+ dans notre étude. Toutefois, la prise en compte de la variabilité du besoin peut amener à recommander des apports plus élevés si l'on veut couvrir les besoins de plus de 50% des animaux du troupeau. L'alternative est de développer une stratégie de précision pour adapter les apports à chaque animal.

CONCLUSION

Le modèle souligne l'utilité des données d'élevage dans la détermination dynamique des besoins nutritionnels individuels. Il pourra être utilisé dans le pilotage en temps réel des apports dans une démarche d'alimentation de précision.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse #DigitAg et bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004.

Ce travail bénéficie de l'aide financière de l'Union Européenne dans le cadre du projet de recherche "Feed-a-Gene" sous l'égide du programme "H2020 – Recherche et Innovation" (Grant agreement No 633531).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bikker P., Blok M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows. CVB Documentation report, Wageningen Livestock Research, Wageningen, 74 p.
- Cloutier L., Pomar C., Létourneau-Montminy M.P., Bernier J.F., Pomar J., 2015. Evaluation of a method estimating real-time individual lysine requirements in two lines of growing-finishing pigs. *Animal*, 9, 561-568.
- Dourmad J.Y., Noblet J., Etienne M., 1998. Effect of protein and lysine supply on performance, nitrogen balance, and body composition changes of sows during lactation. *J. Anim. Sci.*, 76, 542-550.
- Dourmad J.Y., Etienne M., Valancogne A., Dubois S., van Milgen J., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of sows. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 372-386.
- Dourmad J.Y., Brossard L., Pomar C., Pomar J., Gagnon P., Cloutier L., 2017. Development of a decision support tool for precision feeding of pregnant sows. In: Proc. of the 8th. European Conference on Precision Livestock Farming (ECPLF), Nantes, France, pp 584-592.
- Graves W.E., Lauderdale J.W., Kirkpatrick R.L., First N.L., Casida L.E., 1967. Tissue changes in the involuting uterus of the postpartum sow. *J. Anim. Sci.*, 26, 365-371.
- Hansen A.V., Strathe A.B., Kebreab E., France J., Theil P.K., 2012. Predicting milk yield and composition in lactating sows: A Bayesian approach. *J. Anim. Sci.*, 90, 2285-2298.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Jones D.B., Stahly T.S., 1999. Impact of amino acid nutrition during lactation on luteinizing hormone secretion and return to estrus in primiparous sows. *J. Anim. Sci.*, 77, 1523-1531.
- Moughan P., 1999. Protein metabolism in the growing pig. In: I. Kyriazakis (Ed) *A quantitative biology of the pig*, CAB, 299-331. Wallingford, UK.
- Noblet J., 1990. Bases d'estimation du besoin énergétique de la truie au cours du cycle de reproduction. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Paris, France, 150 p.
- Noblet J., Dourmad J.Y., Etienne M., 1990. Energy utilization in pregnant and lactating sows: modeling of energy requirements. *J. Anim. Sci.*, 68, 562-572.
- Noblet J., Etienne M., 1986. Effect of energy level in lactating sows on yield and composition of milk and nutrient balance of piglets. *J. Anim. Sci.*, 63, 1888-1896.
- Noblet J., Etienne M., 1987. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in lactating sows. *J. Anim. Sci.*, 64, 774-781.
- Noblet J., Etienne M., 1989. Estimation of sow milk nutrient output. *J. Anim. Sci.*, 67, 3352-3359.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine. National Academies Press, Washington, D.C, 11th rev, 400 p.
- Palmer W.M., Teague H.S., Venzke W.G., 1965. Macroscopic observations on the reproductive tract of the sow during lactation and early postweaning. *J. Anim. Sci.*, 24, 541-545.
- Strathe A.V., Strathe A.B., Theil P.K., Hansen C.F., Kebreab E., 2015. Determination of protein and amino acid requirements of lactating sows using a population-based factorial approach. *Animal*, 9, 1319-1328.
- Trottier N.L., Johnston L.J., de Lange C.F.M., 2015. Applied amino acid and energy feeding of sows. In: *The gestating and lactating sow*, C. Farmer (Ed.), Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 117-146.
- Sauvant D., Pérez J.M., Tran G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Editions INRA, Paris, France.
- van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.Y., Sève B., Noblet J., 2008. InraPorc: A model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 143, 387-405.