HAL
open science

Modélisation du besoin en calcium et variations du rapport phosphocalcique de l'aliment selon le niveau de performance de la truie reproductrice

Nathalie Quiniou, Anne Boudon, Jean-Yves Dourmad, Maud Moinecourt, Nathalie Priymenko, Agnès Narcy

To cite this version:

Nathalie Quiniou, Anne Boudon, Jean-Yves Dourmad, Maud Moinecourt, Nathalie Priymenko, et al.. Modélisation du besoin en calcium et variations du rapport phosphocalcique de l'aliment selon le niveau de performance de la truie reproductrice. 51. Journées de la Recherche Porcine, Feb 2019, Paris, France. hal-02097216

HAL Id: hal-02097216

https://hal.science/hal-02097216v1

Submitted on 11 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

2019. Journées Recherche Porcine, 51, 141-152.

Modélisation du besoin en calcium et variations du rapport phosphocalcique de l'aliment selon le niveau de performance de la truie reproductrice

Nathalie QUINIOU (1), Anne BOUDON (2), Jean-Yves DOURMAD (2), Maud MOINECOURT (3), Nathalie PRIYMENKO (3), Agnès NARCY (4)

(1) IFIP - Institut du Porc, BP 35104, 35651 Le Rheu Cedex, France
(2) PEGASE, INRA, AGROCAMPUS OUEST, 35590 Saint-Gilles, France
(3) TOXALIM, INRA, ENVT, BP 87614, 31076 Toulouse Cedex 3, France
(4) BOA, INRA, 37380 Nouzilly, France

nathalie.quiniou@ifip.asso.fr

Cette synthèse a été réalisée avec le soutien d'INAPORC (collège « Alimentation du bétail ») et de la société NUWEN.

Modélisation du besoin en calcium et variations du rapport phosphocalcique de l'aliment selon le niveau de performance de la truie reproductrice

Le coût élevé des sources de phosphore et l'impact d'un apport en excès de cet élément sur l'environnement conduisent à restreindre les apports en phosphore aux besoins chez la truie reproductrice. Au contraire, les sources de calcium sont peu onéreuses et, en l'absence de contrainte de teneur maximale sur cet élément, sa teneur peut être assez élevée dans les aliments. Phosphore et calcium doivent pourtant être apportés de façon équilibrée. Un modèle est proposé pour estimer les besoins en calcium de la truie reproductrice sur la base des connaissances disponibles, beaucoup plus limitées pour cet élément que pour le phosphore. Dès l'étape de l'absorption digestive, plusieurs systèmes opérationnels et des tables de valeurs permettent de raisonner l'apport en phosphore sur une base digestible, mais ce n'est pas encore le cas pour le calcium. Une hypothèse de digestibilité est donc appliquée dans le modèle pour estimer le besoin en calcium total, qui devra être actualisée (de même que le calcul du besoin d'entretien) dès que les tables de valeurs des matières premières permettront de formuler les aliments sur la base du calcium digestible. Cette réserve étant posée, le modèle est utilisé pour quantifier le besoin selon le stade physiologique de la truie et son niveau de production (prolificité, production de lait). En l'absence de prise en compte du degré de minéralisation osseuse, il ne peut cependant pas être utilisé pour simuler les effets d'une carence en l'apport de l'un ou l'autre minéral.

Modelling calcium requirement and variation in dietary calcium:phosphorus ratio with performance level of the reproductive sow

Due to the cost of dietary phosphorus supplements and consequences of phosphorus supplied in excess on the environment, a strong trend towards improved adequacy between its supplies and requirements has been observed for a while in reproductive sows. Conversely, calcium supplements are presently inexpensive, and dietary calcium content is not limited by any regulation. As calcium and phosphorus interact in the digestive tract and in their metabolism, their supplies need to be balanced. Based on available literature on phosphorus (large) and calcium (scarce), a model was developed that assesses calcium requirements in reproductive sows. Phosphorus can be supplied on a digestible basis with reference to available systems and tables of nutritive values of feedstuffs, but this is not presently the case for calcium. Consequently, different hypotheses for calcium digestibility are used in the model, which will need to be updated (as will the definition of the maintenance requirement) as soon as the feedstuff tables have been documented with this criterion. Given this limitation, the model is used to investigate the effect of physiological stage and productivity level (prolificacy, milk production) on the daily requirement of total calcium. As the degree of bone mineralisation is not considered, the model cannot be used to simulate consequences of inadequate supplies of calcium or phosphorus.

INTRODUCTION

L'étude des besoins en énergie et en acides aminés de la truie mobilise plusieurs équipes de recherche dans le monde. Plus rares sont celles qui se consacrent à l'étude des besoins en minéraux. Ces derniers sont pourtant impliqués dans de nombreuses fonctions métaboliques et influencent le niveau de performance de reproduction (Pointillart, 1984). D'après van Riet *et al.* (2013), les problèmes de boiterie touchent 10 à 15% des truies en Europe ce qui pénalise leur longévité et accroit les taux de pertes de porcelets en maternité. Or, la qualité des apports en minéraux joue notamment un rôle important dans la prévention des boiteries (Suttle, 2010).

L'alimentation adéquate doit permettre de couvrir les besoins en calcium et phosphore tout au long de la vie de l'animal. Ceux-ci augmentent avec le niveau de performance, mais les apports doivent rester parcimonieux pour plusieurs raisons qui incitent à optimiser les apports au regard des besoins de l'animal : (1) le coût économique des sources minérales dans l'aliment, notamment pour le phosphore dont les réserves naturelles (phosphates) utilisables en alimentation animale se raréfient au niveau mondial, (2) l'impact des rejets en minéraux dans l'environnement, en particulier les rejets en phosphore qui altèrent la qualité des eaux et favorisent l'eutrophisation, (3) les interactions entre calcium et phosphore au niveau digestif ou métabolique.

Concernant le phosphore, l'enjeu de la conduite alimentaire est de couvrir au mieux les besoins tout en respectant les contraintes de formulation maximales en phosphore total imposées depuis plusieurs années (Corpen, 2003 ; Dourmad *et al.*, 2015). L'alimentation de précision développée pour une utilisation optimisée des nutriments tant d'un point de vue économique qu'environnemental et pour une épargne des ressources augmente de fait la fréquence des situations d'apport en adéquation au besoin. Du fait des interactions existant entre le phosphore et le calcium au niveau digestif, la truie alimentée au besoin peut basculer en situation de carence en phosphore si l'apport en calcium est excessif (Pointillart *et al.*, 1987). Ainsi, même si le calcium est actuellement peu onéreux et que sa teneur dans l'aliment n'est pas soumise à des contraintes règlementaires, il focalise de plus en plus l'attention des nutritionnistes.

Après un bref rappel de quelques connaissances de base sur l'utilisation du calcium et son rôle chez la truie, cette synthèse s'articule autour de la présentation et de l'utilisation d'un modèle mécaniste de prédiction du besoin en calcium. Adossé à un modèle d'estimation du besoin en phosphore, il permet également d'estimer le rapport phospho-calcique.

1. LE CALCIUM DANS L'ORGANISME

Chez le Porc, 99% du calcium (Ca, masse molaire 40,08 g/mol) et 75% du phosphore (P, masse molaire 30,97 g/mol) de l'organisme sont stockés dans l'os. La part de calcium non stocké dans l'os circule dans l'organisme sous forme libre (50%), liée à des protéines (40%) ou complexée à d'autres ions (10%) (Crenshaw, 2001). Elle se répartit entre les tissus mous (compartiment intracellulaire) et les fluides extracellulaires (principalement le sang). La forme libre (ionisée) Ca^{2+} ne représente que 0,5% du calcium total de l'organisme. Le calcium peut activer ou stabiliser de nombreuses enzymes, directement ou après formation d'un complexe avec des protéines ou avec des acides organiques ou inorganiques.

De nombreux mécanismes de contrôle permettent de maintenir la teneur plasmatique en calcium ionisé (Pointillart, 1984). Ils reposent sur l'activation ou non du transport actif impliqué dans l'absorption intestinale (voir plus loin), sur l'excrétion rénale et sur l'équilibre entre accrétion et résorption osseuse.

1.1. Compartiment osseux

Chez les animaux matures, l'os ne grandit plus mais est un tissu en constant renouvellement. Ce remodelage fait intervenir deux types cellulaires qui agissent de manière couplée : les ostéoclastes résorbent l'os ancien puis les ostéoblastes apposent une matrice collagénique qu'ils vont minéraliser (Moinecourt, 2003). Le rapport Ca/P massique dans l'hydroxyapatite qui constitue 85% des cristaux osseux est de 2,16, son rapport molaire est de 1,67 (Crenshaw, 2001).

En situations tendant vers l'hyper- ou l'hypo-calcémie, différentes hormones modulent le turn-over osseux. L'accrétion osseuse est régulée, d'une part, par la calcitonine, hormone hypocalcémiante qui favorise le dépôt de calcium dans l'os et diminue la réabsorption rénale du calcium et, d'autre part, par le cortisol qui stimule le catabolisme protéique, ralentit la formation de la trame organique de l'os et, par ailleurs, inhibe l'absorption intestinale du calcium. La résorption osseuse est régulée par plusieurs hormones (Moinecourt et Priymenko, 2006). La parathormone (PTH), une hormone hypercalcémiante sécrétée par les parathyroïdes, ou son homologue (la PTH related protein, PTHrP) sécrétée par la glande mammaire, augmentent la résorption osseuse ainsi que la réabsorption au niveau rénal et, indirectement *via* l'activation de la vitamine D, l'absorption au niveau intestinal. Le calcitriol (dihydroxy-cholecaliferol ou $1,25(OH)_2D_3$) est une hormone hyper-calcémiante issue de la phosphorylation de la vitamine D, qui stimule la résorption osseuse ainsi que l'absorption intestinale (voir plus loin) et la réabsorption rénale du calcium. Enfin, la calcitonine est une hormone hypocalcémiante, qui inhibe la résorption osseuse via une baisse d'activité des ostéoclastes.

De 15 à 20% du calcium osseux peuvent être mobilisés en situation de carence pendant la lactation (Jondreville et Dourmad, 2005). La résorption de l'os provoquée par un déficit en l'un des deux éléments, calcium ou phosphore, conduit inexorablement à la libération de l'autre.

1.2. Compartiment extra- et intra-cellulaire

Le calcium ionisé présent dans le compartiment vasculaire est la fraction physiologiquement active du calcium. Seule la forme ionisée Ca^{2+} peut traverser les membranes plasmiques. Le calcium circule sous une forme liée aux protéines, principalement l'albumine. Il est un des composants des complexes activés dans les différentes étapes de la coagulation sanguine. La fraction de calcium ionisée ou liée aux protéines dépend du pH sanguin, le Ca^{2+} se liant aux sites des protéines portant une charge négative, en compétition avec les ions H^+.

Le calcium ionisé intervient dans la perméabilité des membranes aux ions. Son entrée dans les neurones est favorisée par l'arrivée d'un potentiel d'action qui provoque l'ouverture des canaux calciques potentiel-dépendants. Le calcium provoque alors la libération de neurotransmetteurs (Peschanski, 1994).

Au niveau des muscles striés, le calcium contribue à la levée de l'inhibition de la liaison actine-myosine, ce qui entraîne la contraction (Lefaucheur, 2010). Il interagit avec d'autres cations pour modifier l'excitabilité neuromusculaire, les crises de

tétanie étant ainsi observées en situation de carence simultanée en calcium et magnésium (Pérez, 1978).

Au niveau du muscle lisse de l'utérus, le complexe que forment le calcium et la calmoduline phosphoryle la myosine, qui peut alors interagir avec l'actine pour engendrer la contraction (Inserm, 1997). L'injection de prostaglandine induit le démarrage de la mise bas, notamment via l'augmentation de la concentration en calcium intracellulaire (Inserm, 1997).

Au niveau ovocytaire, De Nadai *et al*. (1999) rapportent qu'une augmentation rapide et transitoire de la teneur en Ca^{2+} est observée après la fécondation chez de nombreuses espèces, ce qui permet le démarrage du développement embryonnaire. Chez les mammifères, le « signal calcique » serait dû à la libération de calcium par le réticulum après l'activation de canaux calciques sensibles à l'adénosine di-phosphate ou à l'inositol tri-phosphate, mais la contribution respective de ces deux voies dans l'activation ovocytaire n'a pas été décrite chez la truie à ce jour. L'hypothèse d'un transit de calcium provenant du spermatozoïde ou du milieu extracellulaire est également avancée (De Nadai *et al*., 1999).

2. ABSORPTION DU CALCIUM

2.1. Mécanismes

Le calcium est absorbé par diffusion passive et par transport actif à travers la muqueuse intestinale (de Barboza *et al*., 2015). La diffusion passive est observée tout au long de l'intestin grêle. Le transport actif intervient essentiellement dans le duodénum et le jéjunum. L'efficacité de l'utilisation digestive des minéraux dépend de leur solubilité et de la régulation de l'absorption intestinale, toutes deux confondues dans la notion de digestibilité.

2.2. Régulation

La diffusion passive est une voie non saturable qui intervient même en situation d'apports élevés en calcium. Elle dépend du gradient de concentration en calcium entre la lumière intestinale et le plasma (Valdiguié, 2000). L'essentiel de la régulation de l'absorption liée à la couverture du besoin doit être attribué à la voie active. C'est un processus saturable dont la contribution à l'absorption totale est majeure en situation d'apports alimentaires faibles ou modérés relativement au besoin (Figure 1). A l'inverse en situation d'apports élevés, seule la voie passive est impliquée dans l'absorption du calcium supplémentaire ingéré (Fleet et Schoch, 2010).

Différents modèles d'absorption active du calcium sont proposés (Fleet et Schoch, 2010). Le modèle le plus souvent décrit est le modèle de diffusion facilitée sous l'action du calcitriol. Une diminution de la teneur en calcium ionisé dans le liquide extracellulaire stimule la sécrétion de la PTH par la glande parathyroïde. La PTH stimule alors l'hydroxylation de la vitamine D_3 (cholecalciférol) en 25-(OH)D_3 dans le foie, puis en 1,25-(OH_2)D_3 (dihydroxy-cholecalciferol ou calcitriol) dans les reins mais également dans la moelle, la peau et les muqueuses intestinales (Suttle, 2010). Le calcitriol ouvre les canaux d'absorption du calcium de la muqueuse intestinale et active une protéine de transport du calcium (Ca-binding protein ou calbindin). Le calcium est ensuite libéré dans la circulation sanguine par l'intermédiaire d'une ATPase calcium et magnésium dépendante et d'échangeurs Na^+/Ca^{2+}.

De même que pour le phosphore, plus l'apport alimentaire se rapproche du besoin, moins l'absorption marginale est élevée et plus les pertes fécales augmentent. Du fait de ces régulations, la digestibilité apparente du calcium dépend du niveau d'apport relativement au besoin, ce qui implique de se placer en dessous du besoin pour mesurer sa digestibilité maximale.

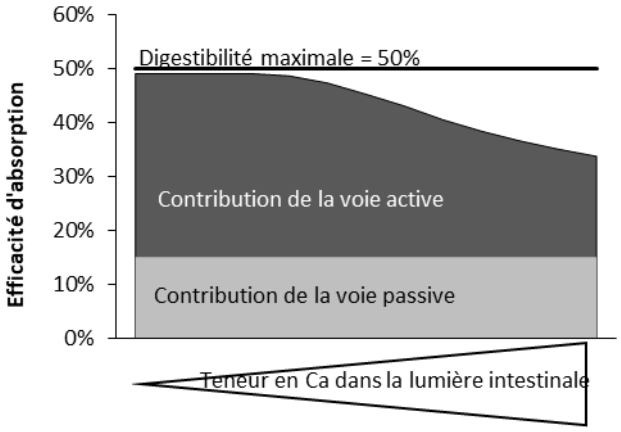

Figure 1 - Contribution relative des voies d'absorption passive ou active à l'efficacité totale de l'absorption du calcium[1]

[1]D'après Fleet et Schoch (2010), sur la base d'une digestibilité maximale du calcium ingéré supposée à 50%.

2.3. Statut physiologique et hormones

Outre la PTH, les œstrogènes, la prolactine (chez la brebis) et l'hormone de croissance stimulent indirectement l'absorption de calcium via la sensibilité intestinale au calcitriol (Fleet et Schoch, 2010). D'après Moinecourt (2003) et Yen (2015), l'effet du cortisol n'est pas décrit chez le Porc ; chez d'autres espèces il ralentit l'accrétion osseuse et réduit l'absorption intestinale.

L'augmentation des concentrations circulantes en œstrogènes vers la fin du premier mois de gestation et à la fin de la gestation contribue à une meilleure absorption intestinale. Après la mise bas, la prolactine prend le relais pour favoriser l'absorption du calcium comme cela a été mis en évidence chez la femme (Kovacs, 2005) et la rate (Fleet et Schoch, 2010). La chute des œstrogènes après la mise bas est un facteur facilitant la résorption osseuse du stock minéral, contribuant à la couverture des besoins liés à la production de lait.

2.4. Interaction avec le phosphore

L'équilibre entre les apports en calcium et en phosphore est déterminant pour leur absorption respective, un excès de l'un pouvant diminuer l'absorption de l'autre (Létourneau-Montminy *et al*., 2012). En effet, l'excès de calcium dans le tube digestif conduit à la formation de complexes avec les phosphates et/ou les phytates (ou phosphore phytique). De même, un excès de phosphore conduit à la formation de complexes phospho-calciques.

Outre le piégeage du calcium, l'excès de phosphore inhibe les mécanismes impliqués dans l'activation de la vitamine D en calcitriol au niveau rénal. En effet, bien que la synthèse de PTH soit principalement déclenchée lors d'un risque de baisse de la calcémie, elle peut être stimulée par une augmentation de la concentration circulante en phosphates car elle inhibe alors leur réabsorption rénale. En cas d'augmentation de la concentration circulante en phosphates, le fibroblast growth factor 23 est également stimulé, qui intervient en synergie avec la PTH dans l'augmentation de l'excrétion rénale du phosphore et diminue l'absorption intestinale du phosphore via une réduction de la synthèse du calcitriol (Bergwitz et Jüppner, 2010). Cela se répercute donc aussi sur les capacités d'absorption du calcium.

L'équilibre phospho-calcique est également déterminant pour l'accrétion osseuse. Des apports faibles en calcium visant à accroitre la digestibilité du phosphore peuvent ainsi s'avérer insuffisants pour la minéralisation osseuse, conduisant alors à un accroissement de l'excrétion urinaire de phosphore (Létourneau-Montminy *et al*., 2012).

3. SYSTEME UTILISE EN FORMULATION

Un système opérationnel et des tables de valeurs pour les différentes matières premières utilisées dans les aliments des porcs permettent de raisonner l'apport en phosphore sur une base digestible fécale apparente (plus communément décrite par le CUD, coefficient d'utilisation digestive) :

CUD (%) = (P ingéré – P fécal) / P ingéré x 100

Ce n'est actuellement pas le cas pour le calcium. Les tables INRA-AFZ (2004) présentent seulement des teneurs moyennes en calcium total pour chaque matière première dont les sources de calcaire, qui sont les principales pourvoyeuses de calcium dans l'aliment. Les tables ne distinguent pas le gisement d'origine. Or le gisement influence non seulement la teneur en calcium, mais également sa disponibilité (Samson *et al*., 2013). Ainsi, dans l'attente de valeurs de tables actualisées, le modèle présenté plus loin recourt à une valeur théorique du CUD du calcium fixée à 50% pour raisonner le besoin en calcium total, valeur également retenue par Guéguen et Pérez (1981). Pour le phosphore, le besoin est exprimé sur la base de la teneur en élément digestible apparent. Dans ce système, les pertes endogènes fécales sont déjà comptabilisées et ne doivent pas être reprises dans le besoin d'entretien (Jondreville et Dourmad, 2005).

Des travaux sont conduits à l'Université de l'Illinois pour développer un système de digestibilité standardisée du calcium permettant de mieux caractériser les apports des différentes matières premières. Il se rapproche de la démarche mise en œuvre sur les acides aminés au niveau iléal (Stein *et al.*, 2007). La digestibilité fécale standardisée (STTD : standardized total tract digestibility) est obtenue après avoir distingué les pertes endogènes basales (liées à l'animal et son niveau de matière sèche ingérée) des pertes spécifiques (liées à la matière première) :

STTD (%) = [P ingéré – (P fécal - P endogène)] / P ingéré x 100

Cette approche est également utilisée par le NRC (2012) pour le phosphore. Dans ce cas, les pertes endogènes fécales sont prises en compte dans la composante d'entretien du besoin. L'utilisation de l'un ou l'autre système modifie peu le classement des principales matières premières mais les deux approches ne peuvent pas être combinées lors de la formulation (Tableau 1).

4. CRITERES D'EVALUATION DU BESOIN

Chez le porc charcutier, une chute d'appétit peut conduire à suspecter rapidement une carence en phosphore, mais ce critère ne peut être utilisé chez la truie gestante puisqu'elle est alimentée de façon rationnée. Ainsi, l'étude du besoin en minéraux des reproducteurs implique la mise en place d'essais de longue durée. Or, si la période de carence se prolonge, les problèmes de reproduction ou de locomotion peuvent être d'une gravité telle que le rétablissement de l'équilibre alimentaire ne permet pas d'y remédier (Pointillart, 1984).

Etant donné l'ensemble des mécanismes mis en œuvre dans l'homéostasie calcique, l'étude de la teneur en calcium circulant n'est pas suffisante pour établir le statut de l'animal. De façon empirique, les essais dose-réponse présentent l'inconvénient d'aboutir à des conclusions qui dépendent du critère étudié, des choix de formulation de l'aliment, voire des interactions avec d'autres minéraux. Par ailleurs, la définition du besoin sur la base de critères de performances maximisés, dont le degré de minéralisation osseuse, peut conduire à des niveaux d'apports très élevés que certains auteurs considèrent même extravagant (*sic*) pour alimenter le porc en croissance (Suttle, 2010).

En revanche, chez la truie, rechercher à maximiser le degré de minéralisation à certains stades du cycle présente un intérêt majeur. Chez la jeune truie, il s'agit de préparer un squelette solide en début de carrière, permettant d'assurer la longévité. Chez la truie gravide, il s'agit de reconstituer les réserves après des phases de mobilisation.

Tableau 1 – Digestibilité fécale apparente (CUD) ou standardisée (STTD) du calcium chez le porc (vers 20 kg)

Source	Ca, g/kg	CUD, %	STTD, %
Matière première			
$CaCO_3$[1]	418,2	57,98	60,43
Phosphate monocalcique[1]	185,4	82,76	85,86
Phosphate bicalcique[1]	216,1	75,29	77,80
Lithothamne calcareum[1]	345,7	62,54	64,98
Co-produit de betterave[1,2]	317,0	66,18	68,41
Aliment			
Farine de poisson / amidon[3]	7,1	40,42	45,64
Far. de p. / amidon / fibre[3]	7,2	57,08	62,23
Farine de poisson / maïs[3]	7,4	84,24	88,99

[1]*González-Vega* et al. *(2015a).*
[2]*Issu de la purification du sucre de betterave.*
[3]*González-Vega* et al. *(2015b).*

La densité osseuse peut être caractérisée de façon non invasive par rayons X avec les techniques de tomographie (Monziols *et al*., 2014) ou d'absorptiométrie biphotonique à rayons (DXA ; Kipper *et al.,* 2015). Elles sont utilisées dans les travaux conduits *in vivo* chez le porc en croissance, mais ne peuvent être appliquées à la truie pendant sa carrière reproductive en raison de leurs effets potentiellement tératogènes sur les fœtus. Toutefois, si des mesures étaient réalisées dans un cadre expérimental chez des truies non vouées à poursuivre leur carrière, un travail méthodologique devrait être entrepris afin de pouvoir mettre en relation la densité de l'os et le statut minéral de la truie lors de phases successives de mobilisation et de récupération.

Les méthodes de marquage radio-isotopique utilisées pendant longtemps (Guéguen et Rérat, 1967) sont aujourd'hui difficiles à mettre en œuvre du fait de l'évolution de la réglementation. Des méthodes alternatives d'analyses du statut minéral sont développées, fondées sur l'étude de bio-marqueurs sanguins (Narcy, 2013) : marqueurs de l'accrétion (phosphatase alcaline osseuse, ostéocalcine, propeptide C- ou N-terminal du collagène de type I) ou de la résorption (télopeptide N- ou C-terminal du collagène de type I, pyridinoline, désoxypyridinoline, hydroxyproline). Ces marqueurs présentent cependant une grande variabilité à l'environnement et une grande variabilité inter-individuelle (Narcy, 2013). Ils doivent être considérés comme des indicateurs qualitatifs du statut minéral.

5. MODELISER LES BESOINS

Le modèle proposé pour l'estimation du besoin en calcium est associé à celui de l'estimation du besoin en phosphore sur la base de sa teneur digestible fécale apparente. Tant que les

apports ne dépassent pas les besoins, l'efficacité d'absorption des minéraux est supposée maximale. Le modèle est de type déterministe, mécaniste et dynamique. L'approche factorielle du besoin considère, d'une part, une composante de besoin d'entretien et, d'autre part, une composante de besoin de production, et leurs facteurs de variation.

Selon le compartiment du besoin considéré, des hypothèses de relations étroites entre les masses protéiques et minérales ou entre minéraux sont utilisées. Ce modèle se veut dans la continuité de ceux initiés par Pérez (1978), Jondreville et Dourmad (2005), et Moinecourt et Priymenko (2006).

5.1. Besoin d'entretien

Le besoin d'entretien représente les pertes endogènes inévitables. Il est supposé être proportionnel au poids ainsi que proposé initialement par Pérez (1978) et plus récemment par Bikker et Blok (2017). Le besoin d'entretien en calcium est fixé à 35 mg/kg de poids, dont 32 mg/kg correspondraient aux pertes endogènes fécales d'après Guéguen et Pérez (1981). En l'état actuel des connaissances sur l'utilisation digestive du calcium, les deux fractions des pertes endogènes (basales et spécifiques) sont intégrées dans la composante d'entretien du modèle, mais cela sera revu dès que la formulation sur une base digestible sera possible.

Sur la base d'études récentes publiées dans la littérature, Bikker et Blok (2017) proposent de prendre en compte les pertes endogènes basales à un niveau beaucoup plus bas, i.e. 8 mg/kg de poids. Parallèlement, à partir d'une revue de la littérature, ils considèrent que les pertes endogènes urinaires qui peuvent être estimées à 5 mg/kg chez le porc sevré ou à 6 mg/kg chez le porc de 35 kg sont surestimées car obtenues dans des d'études n'ayant pas intégré un régime sans calcium dans leur dispositif expérimental. Des résultats provisoires mis en ligne en septembre 2018 indiquent que les travaux en cours se réfèrent désormais à ce type de régime (Lee et Stein, 2018).

Dans notre modèle, le poids utilisé pour calculer le besoin d'entretien correspond au poids vif minoré de 4% pour tenir compte des contenus digestifs, ce qui est un peu plus élevé que les 3 et 2% qui peuvent être calculés avec l'équation de Dourmad *et al.* (1997) chez des truies pesant, respectivement, 150 et 300 kg. Toutefois, les pratiques de formulation ont évolué vers des aliments de gestation plus dilués en énergie qu'il y a 30 ans, notamment par l'incorporation de sources de fibres, qui conduisent à des rations allouées et des déjections plus volumineuses.

Pendant la gestation, le poids considéré pour calculer le besoin d'entretien (Tableau 2, Eq. 6 et 7) est la somme du poids net de la truie et du conceptus (Tableau 2, Eq. 1) car en pratique il n'est pas possible de les distinguer lors d'une pesée réalisée au cours de la gestation. Or, à court terme, l'acquisition automatique du poids peut être envisagée pour modéliser individuellement et quotidiennement les besoins et mettre en œuvre l'alimentation de précision. En l'absence de suivi dynamique des caractéristiques des truies, l'évolution du poids est modélisée en tenant compte du poids initial (à l'insémination) et du gain de poids escompté pendant la gestation pour atteindre l'objectif d'état à la mise bas qui dépend du type génétique de la truie, de son âge (Quiniou, 2019) et du niveau de rationnement pendant la gestation (Dourmad *et al.*, 1996). La cinétique d'évolution du poids dépend du plan d'alimentation (Quiniou, 2005), principalement de la cinétique des apports en énergie si l'aliment couvre les besoins en acides aminés.

Pendant la lactation, le besoin d'entretien est calculé sur la base du poids de la truie après la mise bas (Tableau 3, Eq. 16 et 17), sans *a priori* sur l'intensité de la mobilisation des réserves à venir du fait du déficit de couverture des besoins en énergie ou acides aminés.

5.2. Gestation

Le besoin de production dépend du dépôt tout au long de la période dans les réserves maternelles, et pendant les deux derniers tiers dans les fœtus et le placenta (Figure 2). Le dépôt dans les fluides placentaires est supposé négligeable.

5.2.1. *Dépôt fœtal*

La teneur en phosphore et la teneur en calcium des fœtus augmentent progressivement au cours de la gestation, i.e. à partir de 10 j de gestation pour le phosphore et à partir de 33 j pour le calcium d'après Bikker et Blok (2017) (Tableau 2, Eq. 4 et 5). A la naissance, elles atteignent, respectivement, 6,2 et 11,0 g/kg d'après Jongbloed *et al.* (2003).

Le dépôt de minéraux dans les fœtus est calculé en combinant les cinétiques d'évolution des teneurs en minéraux et la cinétique d'augmentation du poids de portée *in utero*, modélisée à partir de l'équation proposée par Noblet *et al.* (1985) et corrigée du poids de portée observé à la mise bas en moyenne dans le troupeau (Tableau 2, Eq. 2).

5.2.2. *Dépôt placentaire*

Le développement du compartiment protéique placentaire est représenté à l'aide de l'équation proposée par Noblet *et al.* (1985, Tableau 2, Eq. 3). La quantité de minéraux associée est calculée sur la base de 16 mg de phosphore par g de protéines placentaires et un ratio Ca/P de 0,80 (Bikker et Blok, 2017).

5.2.3. *Dépôt maternel*

En l'absence de données sur la lactation précédente, en particulier sur l'évolution du degré de minéralisation osseuse, le besoin en minéraux pour les dépôts maternels est calculé sans distinguer le dépôt pour la croissance et le dépôt pour la reconstitution des réserves mobilisées. La rétention de phosphore est fixée à 5,5 g par kg de gain de poids de la truie, pour un ratio Ca/P de 1,75 (Bikker et Blok, 2017).

La cinétique d'évolution du poids de la truie dépend des caractéristiques initiales de la truie (poids, épaisseur de lard) et de la quantité d'énergie apportée quotidiennement au-delà du besoin pour l'entretien, l'activité physique, la thermorégulation et le développement de la portée *in utero* (Dourmad *et al*., 2005). La couverture des besoins en acides aminés peut également intervenir sur la cinétique du poids de la truie.

5.3. Lactation

Deux versions du modèle d'estimation du besoin pendant la lactation sont développées, statique ou dynamique selon le mode adopté pour estimer la quantité de lait produite par la truie à partir de la croissance de la portée (Figure 3). L'exportation de phosphore dans le lait est calculée en supposant un ratio phosphore/azote de 0,196 (NRC, 2012 ; Tableau 3, Eq. 18 et 20). L'exportation de calcium est ensuite estimée à partir de l'exportation de phosphore en supposant une teneur en phosphore de 1,42 g/kg lait et une teneur en calcium de 2,0 g/kg lait (Tableau 3, Eq. 19 et 21).

5.4. Besoin total

Le besoin total est calculé à partir du cumul des différentes composantes du besoin pendant la gestation ou la lactation.

Une fois absorbés, les minéraux peuvent être stockés dans différents compartiments ou complexés sous différentes formes, mais pas remaniés à l'inverse des nutriments organiques.

Les composantes du besoin utilisées pour le phosphore peuvent être additionnées directement pour estimer le besoin sur la base de la teneur en phosphore digestible apparent de l'aliment (P_{dig}, Jondreville et Dourmad, 2005) que ce soit pendant la gestation (Tableau 2, Eq. 14) ou la lactation (Tableau 3, Eq. 22). Le besoin en calcium est plus difficile à traduire dans un système commun avec celui utilisé pour formuler l'aliment en raison du manque de connaissances sur l'utilisation digestive du calcium des matières premières. L'aliment étant formulé sur la base d'un apport en calcium total, un CUD hypothétique est appliqué aux composantes de production du besoin pendant la gestation (Tableau 2, Eq. 15) et la lactation (Tableau 3, Eq. 23).

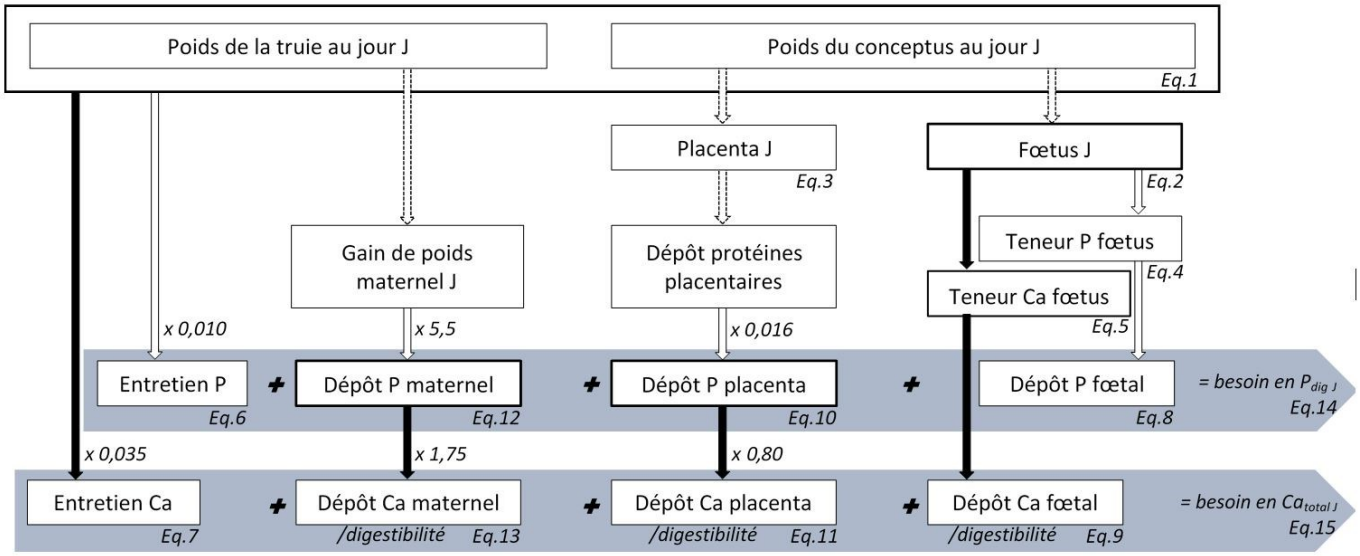

Figure 2 – Modèle dynamique d'estimation du besoin en phosphore (P) et en calcium (Ca) de la truie gestante (le détail des équations utilisées est présenté dans le Tableau 2)

Tableau 2 – Calcul du besoin en phosphore et en calcium pendant la gestation[1,2]

Equations de prédiction des caractéristiques des différents compartiments en fonction du stade de gestation (J)			
Truie, kg[A,B]	$PV_{truie\ J}$ = poids vif de la truie au jour J selon le poids à l'insémination, l'objectif à la mise bas en fonction de l'âge et les apports énergétiques (modélisation InraPorc)		
Conceptus, kg[B,C]	Eq. 1 $PV_{conceptus\ J} = (PV_{portée} \times 1{,}329 + 0{,}3) \times \left[\frac{\exp(8{,}74519 - 1{,}59844\, e^{(-0{,}05407\,(J-45))} + 0{,}00006 \times EM \times J + 0{,}09745 \times N)}{\exp(8{,}74519 - 1{,}59844\, e^{(-0{,}05407\,(115-45))} + 0{,}00006 \times EM \times 115 + 0{,}09745 \times N)} \right]$ où $PV_{portée}$ est le poids de portée moyen observé à la naissance (kg), N est le nombre de porcelets nés, EM la quantité d'énergie métabolisable ingérée (MJ/j).		
Fœtus, kg[C]	Eq. 2 $PV_{fœtus\ J} = PV_{portée} \times \left[\frac{\exp(8{,}72962 - 4{,}07466\, e^{(-0{,}03318\,(J-45))} + 0{,}00154 \times EM \times J + 0{,}06774 \times N)}{\exp(8{,}72962 - 4{,}07466\, e^{(-0{,}03318\,(115-45))} + 0{,}00154 \times EM \times 115 + 0{,}06774 \times N)} \right]$		
Protéines placentaires, kg[C]	Eq. 3 $PROT_{placenta\ J} = \exp(7{,}34264 - 1{,}40598\, e(-0{,}0625 \times (J - 45)) + 0{,}00759 \times J + 0{,}06339 \times N) / 23{,}8$		
Teneur, g/kg fœtus[D,E]	Eq. 4 (J ≥ 10) en phosphore $tP_{fœtus\ J} = \frac{(0{,}0565 \times J - 0{,}736)}{(0{,}0565 \times 115 - 0{,}736)} \times 6{,}2$	Eq. 5 (J ≥ 33) en calcium $tCa_{fœtus}\ J = \frac{(0{,}1244 \times J - 4{,}039)}{(0{,}1244 \times 115 - 4{,}039)} \times 11{,}0$	
Calcul du besoin	**En phosphore**	**En calcium**	**Ca/P**
Entretien, g/j[F]	Eq. 6 $P_{entretien\ J} = 0{,}010 \times (PV_{truie\ J} + PV_{conceptus\ J}) \times 0{,}96$	Eq. 7 $Ca_{entretien\ J} = 0{,}035 \times (PV_{truie\ J} + PV_{conceptus\ J}) \times 0{,}96$	3,50
Dépôt fœtal, g/j	Eq. 8 $dP_{fœtal\ J} = (Fœtus_{J} \times tP_{fœtus\ J}) - (Fœtus_{J-1} \times tP_{fœtus\ J-1})$	Eq. 9 $dCa_{fœtal\ J} = (Fœtus_{J} \times tCa_{fœtus\ J}) - (Fœtus_{J-1} \times tCa_{fœtus\ J-1})$	Selon J
Dépôt placentaire, g/j[D]	Eq. 10 $dP_{placenta}\ J = (PROT_{Placenta\ J} - PROT_{placenta\ J-1}) \times 0{,}016$	Eq. 11 $dCa_{placenta\ J} = dP_{placenta\ J} \times 0{,}80$	0,80
Dépôt maternel, g/j[E]	Eq. 12 $dP_{truie\ J} = 5{,}5 \times gain\ PV_{truie\ J}$	Eq. 13 $dCa_{truie\ J} = dP_{truie\ J} \times 1{,}75$	1,75
Besoin, g/j	Eq. 14 $P_{dig\ J} = P_{entretien\ J} + dP_{fœtus\ J} + dP_{placenta\ J} + dP_{truie\ J}$	Eq. 15 $Ca_{total\ J} = Ca_{entretien\ J} + (dCa_{fœtus\ J} + dCa_{placenta\ J} + dCa_{truie\ J}) / CUD$ où CUD est la digestibilité fécale apparente du Ca	

[1]*Pour une gestation supposée durer 115 j.*

[2]*Références utilisées : A : Quiniou (2019), B : Dourmad* et al. *(2015), C : Noblet* et al. *(1985), D : Bikker et Blok (2017), E : Jongbloed* et al. *(2003), F : Guéguen et Pérez (1981).*

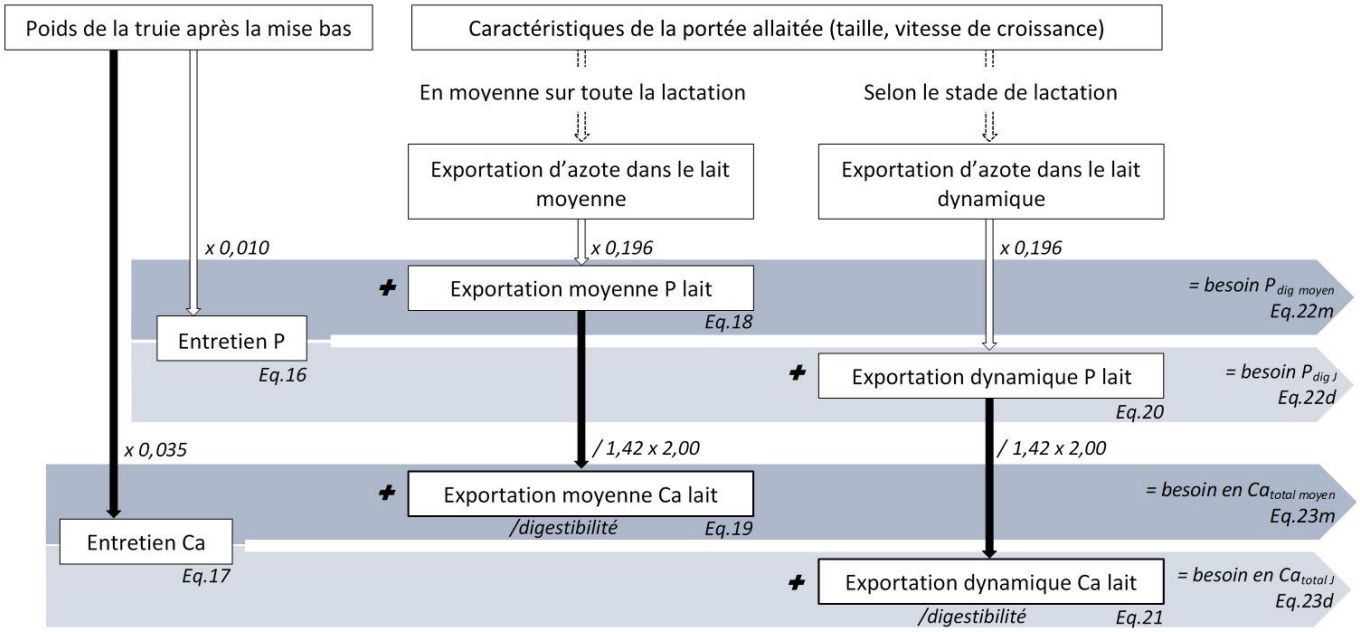

Figure 3 – Modèle d'estimation du besoin en phosphore et en calcium de la truie allaitante (le détail des équations utilisées est présenté dans le tableau 3)

Tableau 3 – Calcul du besoin en phosphore et en calcium pendant la lactation[1,2]

Besoin	En phosphore	En calcium	Ca/P
Entretien, g/j[A]	Eq. 16 $P_{entretien\ J} = 0{,}010 \times PV_{truie} \times 0{,}96$	Eq. 17 $Ca_{entretien}\ J = 0{,}035 \times PV_{truie}\ J \times 0{,}96$	3,50
	où PV_{truie} est le poids de la truie à la mise bas		
Exportation dans le lait, g/j			
Statique[B,C,E]	Eq. 18 $P_{lait\ moyen} = (0{,}0257\ GMQ_{portée} + 0{,}42\ N) \times 0{,}196$	Eq. 19 $Ca_{lait\ moyen}$, g/j = $P_{lait\ moyen}/1{,}42 \times 2{,}00$	1,41
	où $GMQ_{portée}$ est la vitesse de croissance moyenne de la portée (g/j) et N est la taille de portée allaitée		
Dynamique[B,C,E,F]	Eq. 20 $P_{lait\ J} = (0{,}0257\ GMQ_{portée} + 0{,}42\ N) \times (2{,}763 - 0{,}014\ D)\ e^{-0{,}025\ J}\ e^{-\exp(0{,}5-0{,}1\ J)} \times 0{,}196$	Eq. 21 $Ca_{lait\ J} = P_{lait\ J}/1{,}42 \times 2{,}00$	
Besoin, g/j	Eq. 22m $P_{dig\ moyen} = P_{entretien} + P_{lait\ moyen}$ Eq. 22d $P_{dig\ J} = P_{entretien} + P_{lait\ J}$	Eq. 23m $Ca_{total\ moyen} = Ca_{entretien} + (Ca_{lait\ moyen}$ / CUD) Eq. 23d $Ca_{total\ J} = Ca_{entretien} + (Ca_{lait\ J}$ / CUD)	

[1]*Voir le tableau 2 pour les abréviations.*
[2]*Références : A : Guéguen et Pérez (1981), B : Noblet et Etienne (1989), C : NRC (2012), E : Hurley (2015), D : Dourmad* et al. *(2005).*

6. FACTEURS DE VARIATION DU BESOIN EN CALCIUM

Dans le modèle présenté, l'absorption intestinale du calcium est supposée maximale tant que les apports ne dépassent pas les besoins. A défaut de disposer d'informations précises sur ce critère, la digestibilité du calcium (CUD) est fixée à 50% dans le modèle pour évaluer le besoin sur la base du calcium total (Jongbloed *et al*., 1999), sauf dans le paragraphe 6.1.

6.1. Selon l'utilisation digestive du calcium

Le niveau de besoin global dépend du CUD appliqué aux composantes de production du besoin. Un changement d'hypothèse impacte notamment les composantes du besoin liées aux dépôts materno-fœtaux pendant la gestation et à la production de lait ensuite et a donc d'autant plus d'incidence sur le résultat de l'estimation que la truie est productive et que ces deux compartiments contribuent au besoin total au jour J. Ainsi, à la fin de la gestation quand la croissance fœtale est maximale, le besoin exprimé en calcium total est 15 g/j plus élevé sur la base d'un CUD de 30% *vs.* 50%, alors que l'écart est seulement de 5 g/j au début de la gestation (Figure 4).

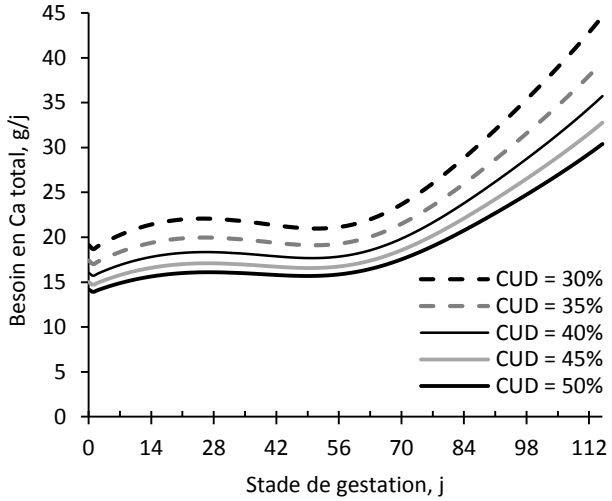

Figure 4 - Evolution du besoin quotidien[1] en calcium total pendant la gestation selon la digestibilité (CUD) du calcium
[1]*Rang de portée : 2, poids au début de la gestation : 200 kg, gain net de gestation : 38 kg, taille de portée : 16 porcelets (23,4 kg), plan de rationnement : constant à 3,0 kg/j (12,16 MJ EM/kg)*

6.2. Selon la prolificité

6.2.1. *Conséquence sur le besoin pendant la gestation*

Le modèle est utilisé pour comparer le besoin en calcium quand la taille de portée augmente de 10 à 18 nés totaux (Tableau 4). Pour tenir compte de l'effet de la prolificité sur le poids de portée à la naissance, les données (n = 1030) obtenues chez des truies multipares croisées Large White x Landrace à la station IFIP de Romillé sont utilisées pour modéliser la relation entre le poids moyen des porcelets et la taille de portée à la naissance (N) : PV, kg/porcelet = 2,184 - 0,45 N, ETR = 0,20. Ainsi, les portées de 10 et 18 porcelets pèsent, respectivement, 17,3 et 24,7 kg à la naissance. Afin de s'affranchir de différences de besoins en minéraux qui pourraient résulter d'une moindre rétention maternelle en parallèle des différences de poids de portée, le niveau de rationnement est modulé afin d'obtenir le même gain de poids net (+38 kg) pour la truie (Tableau 4). Pendant le premier tiers de la gestation, la rétention de calcium au niveau fœtal est négligeable (Figure 5). C'est lors du dernier tiers que les écarts de dépôt se creusent entre les truies selon leur prolificité. En effet, à ce stade non seulement la croissance fœtale est exponentielle (Salmon-Legagneur, 1965), mais elle est également associée à une augmentation de la teneur en minéraux des fœtus. Ainsi, 1 kg de portée *in utero* supplémentaire se traduit par le dépôt de 0,32 g/j de calcium en plus à 112 j de gestation (dépôt placentaire compris), contre seulement 0,17 g/j de plus à 84 j de gestation. A 112 j, l'écart de dépôt quotidien de calcium atteint 2,0 g/j entre des portées de 14 et de 18 (Tableau 4). Dans le cas où l'aliment de gestation est formulé à 9,5 g Ca total/kg pour une ration distribuée proche de 3 kg/j, les besoins des truies les plus prolifiques ne sont pas couverts à la fin de la gestation (Tableau 4).

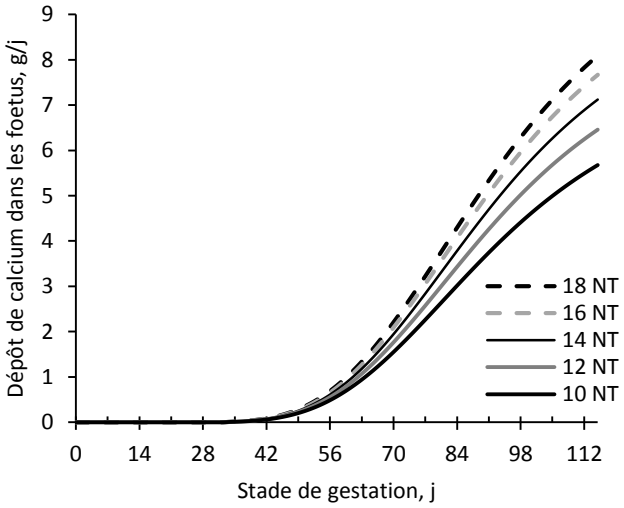

Figure 5 - Evolution de la quantité de calcium déposée quotidiennement dans les fœtus selon la prolificité
(NT : nés totaux, voir tableau 4)

6.2.2. *Conséquence sur le besoin pendant la lactation*

Plus la taille de portée est élevée, plus la truie produit de lait (Etienne *et al.,* 2000) si son statut nutritionnel le permet, *i.e.* selon l'état des réserves à la naissance et la consommation d'aliment en maternité (Noblet et Etienne, 1989 ; Quiniou, 2016). L'équation publiée par Ngo *et al*. (2012) est utilisée pour estimer la vitesse de croissance (GMQ) de la portée selon le nombre de porcelets allaités. Ce critère est ensuite utilisé pour estimer l'exportation dans le lait et le besoin en calcium total correspondant dans le cas où la taille de portée allaitée varie entre 10 et 14 porcelets. La figure 6 illustre l'évolution du besoin au cours de la lactation selon la taille de portée dans le cas où la truie qui allaite est de rang 2 et pèse 240 kg après la mise bas. Son besoin d'entretien en calcium est de 8 g/j en moyenne. Compte tenu de la dynamique de la production de lait, l'entretien représente environ un tiers du besoin total au début de la gestation, mais y contribue ensuite proportionnellement deux fois moins quand le besoin pour la production de lait augmente. Au pic de production (vers 19 j), le besoin quotidien en calcium atteint plus de 60 g/j dans les portées de 14 porcelets, contre 50 g/j dans celles de 10 (Tableau 5, Figure 6).

Exprimé en g/j, le besoin varie selon le poids de la truie (composante d'entretien), et selon le stade de lactation et la quantité de lait produite (composante de production). Or, l'aliment de lactation est formulé en g de calcium/kg alors qu'aux facteurs de variation déjà mentionnés s'ajoute la

Tableau 4 – Evolution des compartiments du besoin en calcium au cours de la gestation selon le stade de gestation et la prolificité

			Nés totaux	**10**	**12**	**14**	**16**	**18**
			Poids de portée, kg	**17,3**	**19,7**	**21,7**	**23,4**	**24,7**
Stade, j	**Poids net de la truie, kg[1]**	**Besoin d'entretien, g/j (E)[2]**	**Dépôt dans les réserves maternelles, g/j (M)[3]**	**Dépôt dans les fœtus et le placenta, g/j (F)**				
0	200	6,7	3,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
28	212	7,1	4,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
56	234	7,9	3,2	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8
70	246	8,3	2,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3
84	254	8,5	2,0	3,1	3,5	3,8	4,1	4,4
98	260	8,7	2,0	4,4	5,1	5,6	6,0	6,3
112	265	8,9	2,8	5,5	6,3	6,9	7,5	7,9
A 112 j		**Ration moyenne allouée, kg/j[4]**		2,96	2,97	2,98	2,99	3,00
		Besoin total si CUD = 50%, g/j[5]		25,5	27,0	28,3	29,3	30,2
		Teneur recommandée dans l'aliment, g Ca/kg		8,6	9,1	9,5	9,7	10,8

[1]*Evolution du poids simulée avec un plan d'alimentation constant. A 112 j de gestation, l'écart de poids brut (truie + conceptus) atteint 10 kg entre les portées de 10 et 18 porcelets (260 vs. 270 kg), ce qui induit une différence de 0,35 g/j de besoin d'entretien en calcium à ce stade.*
[2]*Calculé en moyenne pour les cinq simulations.*
[3]*Identique pour les cinq simulations.*
[4]*Aliment formulé à 9,0 MJ d'énergie nette (12,16 MJ d'énergie métabolisable/kg).*
[5]*Besoin total = E + (M + F)/CUD.*

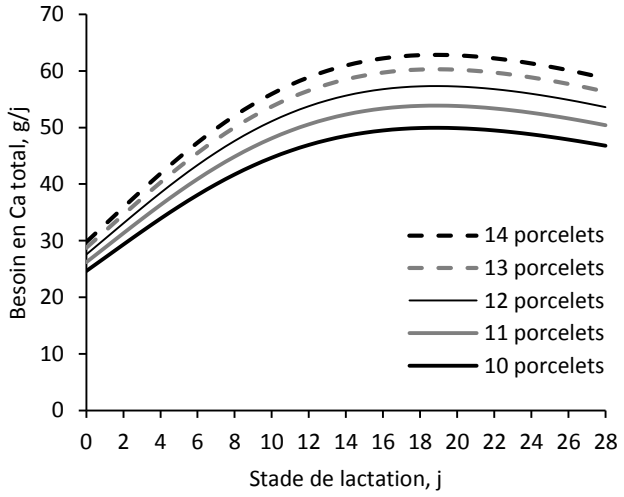

Figure 6 – Evolution dynamique du besoin en calcium total pendant la lactation selon la taille de la portée allaitée[1]

[1]Voir le tableau 5 pour les détails.

Tableau 5 – Effet de la taille de portée sur le besoin en calcium total au pic de lactation (19 j) et conséquence du niveau d'ingestion sur la teneur en calcium de l'aliment au besoin

Taille de portée		**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
GMQ, kg/j[1]		2,40	2,62	2,82	2,98	3,12
Besoin en Ca total à 19 j de lactation, g/j[2]		50,0	53,9	57,3	60,3	62,8
Teneur en calcium dans l'aliment à 19 j selon l'ingestion, g/kg						
Niveau d'ingestion, kg/j	4	12,5	13,5	14,3	15,1	15,7
	5	10,0	10,8	11,5	12,1	12,6
	6	8,3	9,0	9,6	10,1	10,5
	7	7,1	7,7	8,2	8,6	9,0
	8	6,2	6,7	7,2	7,5	7,9
	9	5,5	6,0	6,4	6,7	7,0

[1]Vitesse de croissance moyenne (GMQ) de la portée calculée selon l'équation de Ngo et al. *(2012) pour une truie de rang 2 en supposant qu'à l'échelle du troupeau le GMQ est de 2,8 kg/j et la taille de portée allaitée de 12,5 en moyenne.*

[2]Calcul réalisé à partir des équations présentées dans le tableau 3 en supposant que la truie pèse 240 kg après la mise bas et que le CUD du calcium est de 50%.

variabilité du niveau d'ingestion à un stade de lactation donné d'une truie à l'autre. Il apparaît alors difficile d'ajuster l'apport au besoin de chaque truie quand un seul aliment est utilisé pendant toute la lactation pour toutes les truies. En pratique, de nombreuses truies se retrouvent en situation de carence et commencent alors à mobiliser leur réserve osseuse en minéraux quand d'autres sont en situation d'excès et n'absorbent plus les minéraux avec une efficacité maximale. Des travaux sont actuellement conduits dans l'objectif de développer un outil d'aide à la décision pour les truies allaitantes, qui vise à moduler les apports en acides aminés en fonction du besoin de chaque truie par le mélange en mode dynamique de deux aliments (Gauthier *et al*., 2019). Moduler également les apports en phosphore et en calcium nécessitera le recours à plus de deux aliments en mélange.

7. EQUILIBRE PHOSPHO-CALCIQUE DE L'ALIMENT

Les mécanismes de régulation de la phosphatémie et de la calcémie contribuent à l'homéostasie du rapport phospho-calcique dans le sang. En théorie, il faudrait surtout surveiller ce rapport après l'absorption des deux minéraux. En pratique, cela est difficile et c'est le rapport dans l'aliment qui est contrôlé. Les contraintes environnementales conduisent à formuler les aliments à un niveau relativement bas en phosphore, ce qui peut *de facto* accentuer le risque d'apport en excès de calcium. Le rapport phospho-calcique dans l'aliment est donc d'autant plus important à prendre en compte que les teneurs en calcium et en phosphore sont faibles, ou que l'un des deux éléments est en faible concentration dans l'aliment.

7.1. Observations empiriques sur le rapport Ca_{total}/P_{total}

Un rapport Ca_{total}/P_{total} inférieur à 1 est surtout problématique quand l'aliment contient peu de calcium (Rérat, 1972). Mais pour un apport en calcium correct, un excès de phosphore peut être également néfaste (voir paragraphe 2.4) (Moinecourt et Priymenko, 2006). Selon le NRC (2012), quand l'apport en phosphore est très proche du besoin, le rapport Ca_{total}/P_{total} doit être au maximum de 1,25 jusqu'à 90 j de gestation pour une utilisation maximale des deux minéraux puis ensuite peut être augmenté à 1,34. Chez le porc en croissance, Pointillart *et al*. (1987) observent qu'un rapport Ca_{total}/P_{total} supérieur à 2 conduit à une moindre minéralisation osseuse quand l'aliment est pauvre en phosphore. Dans sa synthèse de 1972, Rérat conclut qu'un rapport supérieur à 3,0 peut ne poser aucun problème si l'aliment est suffisamment riche en phosphore.

7.2. Utilisation de la modélisation pour raisonner le rapport Ca_{total}/P_{dig}

Les valeurs disponibles dans les Tables INRA-AFZ (2004) permettent de formuler l'aliment avec une contrainte de teneur minimale en phosphore digestible et non plus en phosphore total. Par ailleurs, l'incorporation de phytases microbiennes dans l'aliment permet de diminuer la teneur en phosphore total pour une teneur en P_{dig} donnée. En l'absence de connaissances suffisantes sur la digestibilité du calcium des matières premières, en présence ou non de phytases, l'équilibre phospho-calcique de l'aliment est le plus souvent encore raisonné sur la base du rapport entre calcium total et phosphore digestible (Ca_{total}/P_{dig}).

7.2.1. *Pendant la gestation*

Le rapport des besoins Ca_{total}/P_{dig} dépend de la contribution de chaque compartiment au besoin (Figure 7), du rapport Ca/P considéré pour chaque compartiment et du CUD du calcium. A partir des équations présentées dans le tableau 2, le rapport Ca_{total}/P_{dig} spécifique à chaque composante est calculé ci-dessous en supposant que le CUD du calcium est de 50% :

- pour l'entretien 3,50
- pour le dépôt placentaire : 0,80 ÷ CUD = 1,60
- pour le dépôt maternel, 1,75 ÷ CUD = 3,50
- pour la rétention fœtale, le rapport n'est pas constant. En effet, le dépôt de calcium dans les fœtus augmente plus rapidement que le dépôt de phosphore ce qui explique que le ratio entre les teneurs en calcium et en phosphore triple pendant la gestation pour atteindre 1,77 à la naissance (Jongbloed *et al*., 2003 ; Bikker et Blok, 2017). L'évolution des concentrations en minéraux des fœtus parallèlement à la dynamique de leur prise de poids conduit à un rapport Ca_{total}/P_{dig} qui s'accroît de façon non linéaire au cours de la gestation. Sur la base d'un CUD de 50% pour le calcium, le rapport augmente de 1,0 à 33 j de gestation à 3,8 à 115 j de gestation ; il atteint 3,5 après 85 j de gestation quand le besoin fœtal représente déjà 40% du besoin total (Figure 7).

Entre 42 et 85 j, le rapport Ca_{total}/P_{dig} du compartiment fœtal est bas puis ensuite il augmente parallèlement à l'accélération de la croissance fœtale ; cela explique une partie du creux observé en milieu de gestation sur les courbes présentées dans la figure 8. Une autre explication à cette inflexion tient au fait que le placenta se développe principalement pendant le deuxième mois de la gestation et qu'il présente un rapport Ca_{total}/P_{dig} très bas également. Néanmoins, au final, le rapport Ca_{total}/P_{dig} varie sur une plage de valeurs assez limitée quand le CUD est supposé proche de 50% (Figure 8). Pour des valeurs de CUD inférieures, le rapport est beaucoup plus élevé pour les dépôts materno-fœtaux que pour l'entretien ce qui amplifie l'amplitude des variations du rapport Ca_{total}/P_{dig} pendant la gestation (Figure 8).

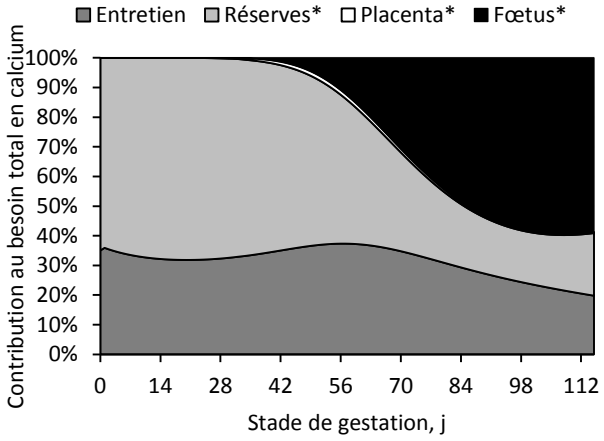

Figure 7 – Evolution pendant la gestation de la contribution de chaque compartiment au besoin global en calcium total[1]

[1]Pour 18 nés totaux (voir la figure 5 et le tableau 4) avec CUD = 50%.

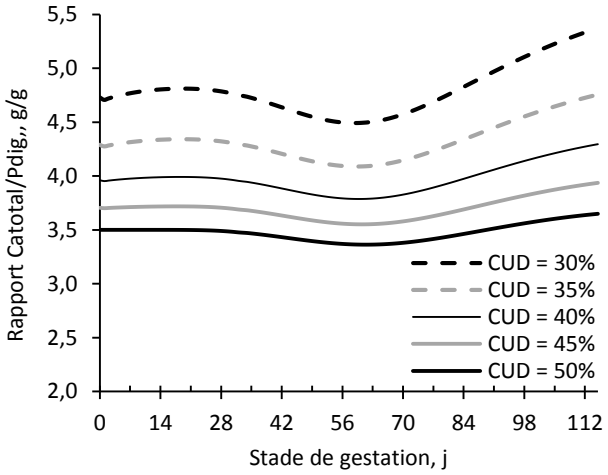

Figure 8 – Evolution du rapport Ca_{total}/P_{dig} pendant la gestation selon la digestibilité (CUD) du calcium

[1]Voir la figure 7 pour la contribution des compartiments au besoin.

7.2.2. *Pendant la lactation*

Les équations 20 et 21 (Tableau 3) permettent de calculer que 100 g supplémentaires de GMQ de portée correspondent à une augmentation du besoin en P_{dig} (ΔP_{dig}) de 0,5 g/j. La quantité de calcium supplémentaire correspondante exportée dans le lait est de 0,7 g/j, qui correspond à un besoin supplémentaire en calcium total (ΔCa_{total}) de 1,4 g/j. En supposant que le CUD est de 50%, cela donne $\Delta Ca_{total} = 2,8 \times \Delta P_{dig}$, ce qui oriente le rapport Ca_{total}/P_{dig} pour le besoin de production vers une valeur moins élevée que pour le besoin d'entretien (3,5). Dans la mesure où le rapport global dépend de la contribution de ces deux compartiments au besoin, plus la truie est lourde, plus le rapport global sera élevé (du fait de l'importance accrue de la part liée à l'entretien), et cela d'autant plus si elle produit peu de lait ce qui est le cas en début de lactation (Figure 9). L'inverse est observé avec un CUD inférieur à 40%, tandis qu'avec une digestibilité de 40% le rapport est de 3,5 pour les deux composantes du besoin.

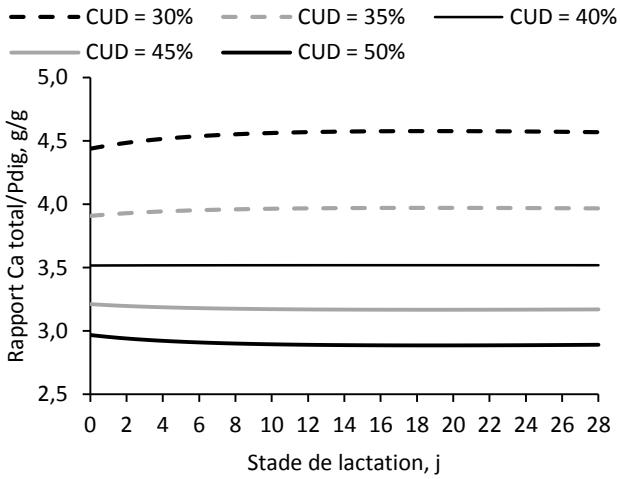

Figure 9 – Evolution du rapport Ca_{total}/P_{dig} pendant la gestation selon la digestibilité (CUD) du calcium[1]

[1]Calculé sur la base d'un GMQ de portée de 3,3 kg/j pour 12,5 porcelets allaités par une truie qui pèse 238 kg après la mise bas.

7.2.3. *Recommandations*

Sur la base des investigations menées avec le modèle, des plages de valeurs sont suggérées pour le rapport Ca_{total}/P_{dig} dans le tableau 6 selon le stade. Sur la base d'un CUD de 50%, Bikker et Blok (2017) suggèrent un ratio de 3,3 dans l'aliment de gestation. Cette valeur plus faible que celles proposées dans le tableau 6 s'explique par un mode de calcul différent du besoin d'entretien en calcium par ces auteurs. Pendant la lactation, la contribution de l'entretien aux besoins est moins importante, et le rapport Ca/Pdig qu'ils recommandent dans l'aliment de lactation est en accord avec la valeur la plus haute proposée dans le tableau 6 (i.e., 3,13 *vs*. 3,1).

Tableau 6 – Valeurs de rapport Ca_{total}/P_{dig} suggérées[1] selon le stade et la digestibilité (CUD) du calcium

Stade		Gestation	Lactation
CUD du calcium	50%	3,5 - 3,7	2,8 - 3,1
	45%	3,7 - 4,0	3,0 - 3,3
	40%	4,0 - 4,3	3,5 - 3,5
	35%	4,4 - 4,8	3,8 - 4,0
	30%	4,9 - 5,4	4,3 - 4,5

[1]Valeurs associées à un rapport Ca/P de 3,5 pour le besoin d'entretien.

Les recommandations sont cependant délicates à établir non seulement à cause des réserves déjà posées antérieurement sur les hypothèses de digestibilité du calcium, mais également du fait que celle-ci est supposée maximale. Or, ce n'est pas le cas à l'instant « t » chez tous les animaux quand un seul aliment est utilisé alors que les besoins diffèrent entre les individus. Les conséquences de la distribution d'un aliment "trop" riche au regard du besoin de certaines truies implique que l'efficacité d'utilisation des minéraux ne sera pas maximale, mais est-ce vraiment l'objectif recherché dans l'absolu ? En effet, si l'absorption maximale du phosphore est atteinte pour un apport sub-limitant en calcium, la résorption de l'os qu'il induit provoque une perte de phosphore par la voie urinaire qui va à l'encontre de la réduction des rejets (fécaux) recherchée.

8. LIMITES DU MODELE

Ainsi que mentionné déjà précédemment, dès lors que les connaissances sur l'utilisation digestive du calcium permettront d'envisager la formulation des aliments sur une autre base que la teneur en calcium total, le modèle devra être revu, en particulier pour ce qui concerne le calcul du besoin d'entretien. Il est probable qu'il faudra alors formuler les aliments avec une contrainte minimale de teneur en calcium digestible pour couvrir le besoin, et une contrainte de teneur maximale en calcium total pour limiter les effets négatifs sur la digestibilité du phosphore.

La quantité de protéines déposées (au niveau maternel ou fœtal) ou exportées (dans le lait) chaque jour est considérée comme la force motrice du besoin minéral dans notre modèle. Ce critère, associé au compartiment lipidique, est en général pertinent pour caractériser un défaut d'apport en énergie ou en acides aminés car il se traduit rapidement par une diminution du gain de poids ou de l'épaisseur de lard dorsal voire une moindre production de lait. L'étude de ces critères zootechniques permet donc d'évaluer la pertinence des apports énergétiques et protéiques, mais ce n'est pas le cas pour les minéraux. Une carence minérale peut passer inaperçue dans un premier temps sur la base d'un suivi des critères zootechniques, car elle est compensée par une modulation des réserves minérales de l'os. Ainsi, chez le porc en croissance, Létourneau-Montminy *et al.* (2015) et Couture *et al*. (2018) démontrent que les compartiments protéiques et minéraux évoluent de façon indépendante chez l'animal nourri autour du besoin, le dépôt de minéraux dans l'os étant très influencé par le niveau des apports, contrairement au dépôt protéique. En l'état, notre modèle ne peut donc pas être utilisé pour simuler les conséquences d'un apport en minéraux en-deçà du besoin sur les différents compartiments pris en compte pour caractériser les performances de la truie.

Le degré de minéralisation osseuse n'étant pas considéré comme une entrée du modèle, il est considéré par défaut à son niveau maximal. Pour permettre la simulation des conséquences à moyen terme d'apports carencés en minéraux sur les performances de la truie, il est nécessaire d'intégrer ce critère dans le modèle. Par ailleurs, il est également indispensable d'intégrer dans un modèle un compartiment permettant de prendre en compte les phénomènes de récupération consécutive à un déficit (« déplétion-réplétion »). Les résultats obtenus chez le porc en croissance doivent encore être mieux explicités et restent à valider chez la truie, mais ils suscitent déjà l'intérêt en offrant des perspectives originales d'amélioration de l'utilisation des minéraux (Gonzalo *et al*., 2018).

CONCLUSION

L'étude du besoin en calcium permet d'évaluer l'équilibre minéral et de mieux raisonner les apports en calcium relativement aux apports en phosphore. La couverture du besoin en limitant les excès à l'échelle individuelle est une perspective à moyen ou long terme. Le premier verrou à lever concerne la caractérisation des sources de calcium et leur interaction avec les technologies appliquées lors de la fabrication de l'aliment (granulométrie, traitement thermique). Le second verrou sera levé par le déploiement de bascules ou autres capteurs permettant d'acquérir les informations nécessaires à la caractérisation des truies pour établir la dynamique de leurs besoins.

Les teneurs en minéraux dans l'aliment sont choisies le plus souvent sur la base du besoin des animaux les plus exigeants. Dans un contexte d'épargne de minéraux et au vu des niveaux de besoins atteints par certaines truies, il est difficile de formuler un aliment avec des teneurs suffisamment élevées pour couvrir le besoin de tous les animaux. Ainsi, les jeunes truies qui sont encore en croissance, produisent beaucoup de lait tout en mangeant peu, présentent un risque de déficit minéral majeur. A court terme, une amélioration de la nutrition minérale de la truie peut alors être envisagée par une gestion des apports plus individualisée et plus dynamique autour de la mise bas sur la base des prédictions réalisées avec le modèle.

Individualiser les apports au début de la gestation apparaît plus risqué, sauf si un compartiment complémentaire "reconstitution osseuse post-tarissement" est intégré au modèle. Cela implique d'acquérir des données sur le degré de minéralisation osseuse de la truie et son évolution au cours du cycle. Cela permettrait notamment de suivre dans quelle mesure une truie qui a fortement mobilisé ses réserves pendant la lactation précédente commence à les restaurer dès le début de la gestation suivante.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bergwitz C., Jüppner H., 2010. Regulation of phosphate homeostasis by PTH, vitamin D, and FGF23. Ann. Rev. Med., 61, 91-104.
- Bikker P., Blok M.C., 2017. Phosphorus ad calcium requirements of growing pigs and sows. CVB Documentation Report n°59, 72 pp.
- Corpen, 2003. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium - cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. Rapport 41 pp. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_2003_06_rejet_porc.pdf
- Couture C., Chiasson R., Pomar C., Létourneau-Montminy M.P., 2018. Évolution de la teneur en protéine corporelle et contenu minéral osseux des porcs charcutiers nourris avec différents niveaux de phosphore et calcium alimentaires. Journées Rech. Porcine, 50, 167-168.
- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: A.J. Lewis and L.L. Southern, editors, Swine nutrition (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, Floride, USA, 187-212.
- De Barboza G.D., Guizzardi S., de Talamoni N.T., 2015. Molecular aspects of intestinal calcium absorption. World J. Gastroenterol., 21, 7142–7154.
- De Nadai C., Chiri S., Ciapa B., 1999. Les mécanismes de l'activation ovocytaire. Méd./Sci. Nouvelles, 15, 1227-1235.
- Dourmad J.Y., Etienne M., Noblet J., 1996. Reconstitution of body reserves in multiparous sows during pregnancy: effect of energy intake during pregnancy and mobilization during the previous lactation. J. Anim. Sci., 74, 2211-2219.
- Dourmad J.Y., Etienne M., Noblet J., Causeur D., 1997. Prédiction de la composition chimique des truies reproductrices à partir du poids vif et de l'épaisseur de lard dorsal Application à la définition des besoins énergétiques. Journées Rech. Porcine, 29, 255-262.
- Dourmad J.Y., Etienne M., Noblet J., Valancogne A., Dubois S., van Milgen J., 2005. InraPorc : un outil d'aide à la décision pour l'alimentation des truies reproductrices. Journées Rech. Porcine, 37, 299-306.
- Dourmad J.Y., Levasseur P., Daumer M., Hassouna M., Landrain B., Lemaire N., Loussouarn A., Salaün Y., Espagnol S., 2015. Évaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. RMT Elevages et Environnement, Paris, 26 pp.

- Etienne M., Legault C., Dourmad J.Y., Noblet J., 2000. Production laitière de la truie : estimation, composition, facteurs de variation et évolution. Journées Rech. Porcine, 32, 253-264.
- Fleet J.C., Schoch R.D., 2010. Molecular mechanisms for regulation of intestinal calcium absorption by vitamin D and other factors. Crit. Rev. Clin. Lab. Sci., 47, 181-195.
- Gauthier R., Guay F., Brossard L., Largouët C., Dourmad J.Y., 2019. Alimentation de précision des truies allaitantes : développement d'un outil d'aide à la décision à l'échelle de l'individu. Journées Rech. Porcine, 51, 117-122.
- González-Vega J.C., Walk C.L., Stein H.H., 2015a. Effects of microbial phytase on apparent and standardized total tract digestibility of calcium in calcium supplements fed to growing pigs. J. Anim. Sci., 93, 2255-2264.
- González-Vega J.C., Walk C.L., Stein H.H., 2015b. Effect of phytate, microbial phytase, fiber, and soybean oil on calculated values for apparent and standardized total tract digestibility of calcium and apparent total tract digestibility of phosphorus in fish meal fed to growing pigs. J. anim. Sci., 93, 4808-4818.
- Gonzalo E., Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Bernier J.F., Pomar C., 2018. Consequences of dietary calcium and phosphorus depletion and repletion feeding sequences on growth performance and body composition of growing pigs. Animal, 12, 1168-1173.
- Guéguen L., Rérat A., 1967. Cinétique de l'absorption intestinale du phosphore chez le porc. Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys., 7, 39-46.
- Guéguen L., Pérez J.M., 1981. A re-evaluation of recommended dietary allowances of calcium and phosphorus for pigs. Proc. Nutr. Soc., 40, 273-278.
- Hurley W.L., 2015. Composition of sow colostrum and milk. In: The gestating and lactating sow, C. Farmer (Ed.), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 209-211.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. D. Sauvant, J.M. Pérez et G. Tran (Eds), INRA Editions, Versailles, France, 304 pp.
- INSERM, 1997. Grande prématurité : dépistage et prévention du risque. Chapitre 7 : Physiologie de la parturition. Expertise collective, éditions INSERM, Paris, France, 99-130.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- Jongbloed A.W., van Diepen J.Th.M., Kemme P.A., 2003. Forfornormen voor varkens herziening 2003. CVB documentatierappport n°30, 66 pp.
- Kipper M., Pomar C., Marcoux M., Neto J.R., 2015. Evaluation de la technologie DXA pour étudier la composition des carcasses de porc et de ses coupes principales. Journées Rech. Porcine, 47, 31-36.
- Kovacs C.S., 2005. Calcium and bone metabolism during pregnancy and lactation. J. Mammary Gland Biol. Neoplasia, 10, 105-118.
- Lee S.A., Stein H.H., 2018. Comparative digestibility and retention rate of calcium and phosphorus in low- and high-phytate diets fed to gestating sows and growing pigs. Stein Nutrition newsletter, Septembre 2018, https://nutrition.ansci.illinois.edu/node/1369, 1 pp.
- Lefaucheur L., 2010. A second look into fibre typing--relation to meat quality. Meat Sci., 84, 257-270.
- Létourneau-Montminy M.P., Jondreville C., Sauvant D., Narcy A., 2012. Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. Animal, 6, 1590-1600.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Dourmad J.Y., Crenshaw T.D., Pomar C., 2015 Modeling the metabolic fate of dietary phosphorus and calcium and the dynamics of body ash content in growing pigs. J. Anim. Sci., 93, 1200-1217.
- Moinecourt M., 2003. L'alimentation en calcium de la truie reproductrice. Thèse ENVT, 90 pp.
- Moinecourt M., Priymenko N., 2006. L'alimentation en calcium chez la truie en production : bases - recommandations - pathologies associées. Rev. Méd. Vét., 157, 121-133.
- Monziols M., Hémonic A., Vautier B., Brossard L., van Milgen J., Quiniou N., 2014. Utilisation de la tomographie RX pour étudier l'évolution de la composition corporelle au cours de la croissance chez des porcs alimentés à volonté ou rationnés. Journées Rech. Porcine, 46, 45-50.
- Narcy A., 2013. Evaluation du statut minéral chez le porc. Journée Technique BNA, 15/11/2013, Châteaubourg.
- Ngo T.T., Quiniou N., Heugebaert S., Paboeuf F., Dourmad J.Y., 2012. Influence du rang de portée et du nombre de porcelets allaités sur la production laitière des truies. Journées Rech. Porcine, 44, 195-196.
- Noblet J., Close W.H., Heavens R.P., 1985. Studies on the energy metabolism of the pregnant sow: 1. Uterus and mammary tissue development. Br. J. Nutr., 53, 251-265.
- Noblet J., Etienne M., 1989. Estimation of sow milk nutrient output. J. Anim. Sci., 67, 3352-3359.
- NRC (National Research Council), 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Ed. National Academies Press, Washington D.C. 400 pp.
- Pérez J.M., 1978. L'alimentation minérale des porcins. TechniPorc, 1(1), 1-32.
- Peschanski M., 1994. Transmission synaptique : le calcium sous haute surveillance. Méd./Sci. Nouv., 10, 106-107.
- Pointillart A., 1984. Pathologie du métabolisme minéral chez le porc. Les dossiers de l'élevage, 5(4), 29-48.
- Pointillart A., Fourdin A., Delmas A., 1987. Conséquences néfastes de l'excès de calcium chez des porcs non supplémentés en phosphore minéral. Journées Rech. Porcine, 19, 281-288.
- Quiniou N., 2005. Influence de la quantité d'aliment allouée à la truie en fin de gestation sur le déroulement de la mise bas, la vitalité des porcelets et les performances de lactation. Journées Rech. Porcine, 37, 187-194.
- Quiniou N., 2016. Conséquences de l'hétérogénéité des réserves corporelles de la truie à la fin de la gestation sur le déroulement de la mise bas et les performances de lactation. Journées Rech. Porcine, 48, 207-312.
- Quiniou N., 2019. Modélisation de l'évolution moyenne du poids vif après la mise bas selon l'âge chez des truies croisées Large White x Landrace. Journées Rech. Porcine, 51, 141-152.
- Rérat A., 1972. De quelques maladies nutritionnelles du porc : revue bibliographique. Ann. Zoot., 21, 245-574.
- Salmon-Legagneur E., 1965. Quelques aspects des relations nutritionnelles entre la gestation et la lactation chez la truie. Ann. Zootech., 14, 1-137.
- Samson A., van Meyel J.P., Launay C., 2013. Influence de l'origine et de la granulométrie du carbonate de calcium sur sa valeur alimentaire pour le porc charcutier. Journées Rech. Porcine, 45, 201-202.
- Stein H.H., Sève B., Fuller M.F., Moughan P.J., de Lange C.F.M., 2007. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. J. Anim. Sci., 85, 172-180.
- Suttle N., 2010. Mineral Nutrition of livestock, 4th edition. Ed. CABI, Wallington, UK, 587 pp. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Producion_Animal/Minerals_in_Animal_Nutrition.pdf
- Valdiguié P., 2000. Biochimie clinique, chapitre 3. Métabolisme phosphocalcique. EMI Ed., Cachan, 61-98.
- Van Riet M.M.J., Millet S., Aluwé M., Janssens G.P.J., 2013. Impact of nutrition on lameness and class health in sows. Livest. Sci., 156, 24-35.
- Yen F.T.P., 2015. Impact of dietary calcium and phosphorus on sow reproductive performance and bone development in piglets. MSc thesis, Saskatchewan University, Canada, 152 pp.