

Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance

Nathalie QUINIOU¹, Anne BOUDON², Jean-Yves DOURMAD², Maud MOINECOURT³, Nathalie PRIYMENKO³, Agnès NARCY⁴

¹IFIP – Institut du Porc, 35651, Le Rheu, France

²PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint-Gilles, France

³TOXALIM, INRAE, ENVT, 31076, Toulouse, France

⁴BOA, INRAE, Université de Tours, 37380, Nouzilly, France

Courriel : nathalie.quiniou@ifip.asso.fr

■ Actuellement le calcium est peu onéreux et sa teneur dans l'aliment n'est pas soumise à des contraintes réglementaires. Cependant, en raison des interactions qui existent entre cet élément et le phosphore au niveau digestif, une truie alimentée au besoin en phosphore peut basculer en situation de carence pour ce minéral si l'apport en calcium est excessif. Par ailleurs, les apports en calcium sont parfois insuffisants. Cela incite donc à mieux raisonner l'apport en calcium, notamment *via* la modélisation des besoins.¹

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 accroît 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), un des indicateurs de santé retenus depuis 2009 dans la démarche Welfare Quality (2009) et plus récemment dans l'outil pratique d'évaluation du bien-être en élevage de porcs qu'elle a inspiré (Courboulay *et al.*, 2019).

L'alimentation minérale 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 :

i) le coût économique des sources minérales dans l'aliment qui varie entre

3 et 7 €/tonne selon le contexte de prix des sources de phosphates et carbonates (Note de Conjoncture IFIP mensuelle, <https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations>) ;

ii) la raréfaction des réserves naturelles en phosphore (phosphates) au niveau mondial, dont celles utilisables en alimentation animale, qui conduit à s'intéresser à des solutions de recyclage pour économiser et prolonger la disponibilité des ressources au-delà du ^{xxii} siècle (Koppelaar et Weikard, 2013) ;

iii) l'impact des rejets en minéraux dans l'environnement, en particulier les rejets en phosphore qui altèrent la qualité des eaux et favorisent l'eutrophication lorsque les quantités épandues

1 Cet article a fait l'objet d'une présentation aux 51^{es} Journées de la Recherche Porcine (Quiniou *et al.*, 2019).

excèdent l'exportation par les cultures (Dourmad et al., 2020) ;

iv) les interactions entre calcium et phosphore aux niveaux digestif et métabolique (Létourneau-Montminy et al., 2014).

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 (P_{total}) imposées en France depuis plusieurs années (Corpen, 2003 ; Dourmad et al.,

2015) selon le stade physiologique, notamment pour les aliments de gestation et de lactation. L'alimentation de précision en cours de développement pour apporter chaque jour à chaque animal les nutriments dont il a besoin devrait permettre une épargne des ressources, celles-ci étant alors utilisées de façon optimisée tant d'un point de vue économique qu'environnemental. Dès lors que les apports en phosphore sont réalisés au niveau du besoin pour alimenter la truie, il n'est plus possible de raisonner indépendamment les recommandations de teneur en calcium sans

risquer une situation de carence. Une approche de modélisation permet de prendre en compte l'incidence des facteurs d'élevage sur les différentes fonctions biologiques impliquées dans la performance animale et le besoin de ces deux minéraux, pour raisonner ensuite les contraintes de formulation des aliments utilisés pour nourrir les truies pendant l'ensemble du cycle de reproduction.

Après un bref rappel de quelques connaissances de bases sur l'utilisation du calcium et son rôle chez la truie, un modèle de prédiction du besoin en calcium est présenté et utilisé pour évaluer l'évolution des besoins selon le potentiel de performance des truies. Adossé à un modèle d'estimation du besoin en phosphore, il permet également d'estimer le rapport phospho-calcique correspondant.

Encadré 1. Le calcium et le phosphore dans l'os.

Forme du Ca et du P dans l'os

Le calcium et le phosphore sont déposés dans l'os majoritairement sous forme de cristaux d'hydroxyapatite ($Ca_5(PO_4)_3(OH)$, phosphate de calcium) qui constituent 85 % des minéraux de l'os. Dans les 15 % de cristaux restant, le calcium est présent sous forme de carbonate de calcium ($CaCO_3$) et fluorure de calcium (CaF_2).

Renouvellement de l'os : phase d'accrétion et de résorption

L'os est un tissu renouvelé en permanence. Le dépôt minéral dans l'os (phase d'accrétion) et la destruction (résorption) du tissu osseux sont régulés par plusieurs hormones.

Réserve et mobilisation du Ca

Si le niveau de réserves est élevé à la mise bas, de 15 à 20 % du calcium osseux peuvent être mobilisés en situation de carence pendant la lactation (Jondreville et Dourmad, 2005), sinon la production de lait diminue (Nimmo et al., 1981).

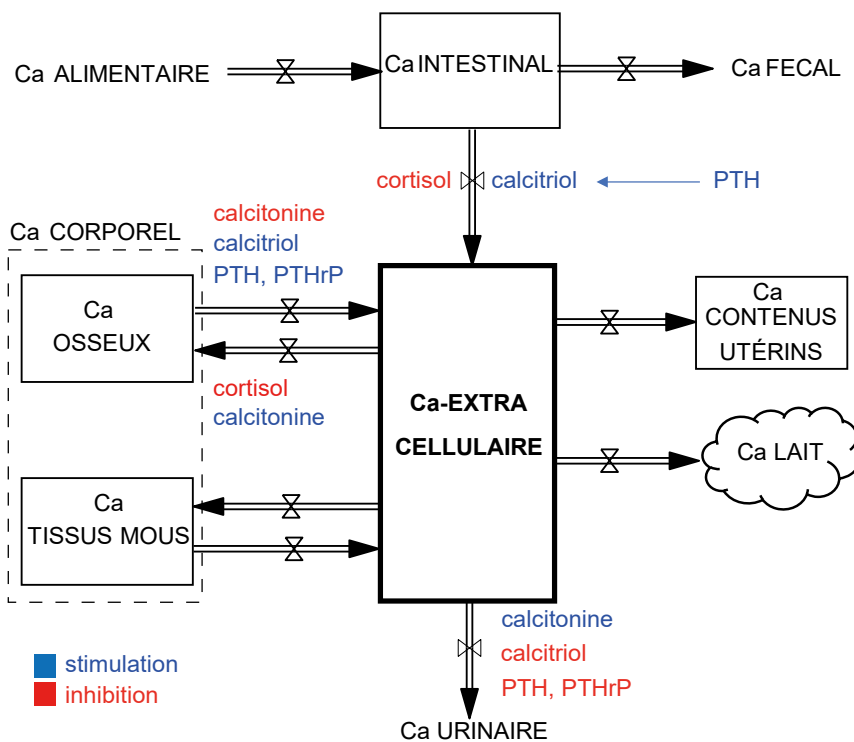
1. Le calcium dans l'organisme

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 (encadré 1). La part de calcium non stockée dans l'os circule dans l'organisme sous forme libre (50 %), liée à des protéines (40 %) ou complexée à d'autres ions (10 %) (Crenshaw, 2000). Elle se répartit entre les tissus mous (compartiment intracellulaire) et les fluides extracellulaires (principalement le sang).

1.1. Constituant essentiel de l'os

L'hydroxyapatite, dont le rapport Ca/P massique est de 2,16 et le rapport molaire de 1,67, constitue 85 % des cristaux osseux (Crenshaw, 2000). Les hormones qui modulent le renouvellement osseux sont impliquées dans la régulation de la calcémie (figure 1). L'accrétion osseuse est régulée, d'une part, par la calcitonine, hormone hypocalcémisante qui favorise le dépôt de calcium dans l'os et diminue la réabsorption rénale du calcium (Suttle, 2010) et, d'autre part, par le cortisol qui stimule le catabolisme

Figure 1. Représentation des différents compartiments de calcium (Ca) de l'organisme et des principales voies de régulation hormonale des flux (processus homéostatiques).



protéique et ralentit la formation de la trame organique de l'os (Weiler *et al.*, 2003). La résorption osseuse est régulée par plusieurs hormones (Moinecourt et Priymenko, 2006). La parathormone (PTH), une hormone hypercalcémiant sécrétée par les parathyroïdes, ou son homologue (la PTH related protein, PTHrP) sécrétée par la glande mammaire, augmente 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-cholecalciferol ou $1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$) est une hormone hypercalcémiant 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 hypocalcémiant, qui inhibe la résorption osseuse *via* une baisse d'activité des ostéoclastes. De 15 à 20 % du calcium osseux de la truie peuvent être mobilisés en situation de carence pendant une lactation qui dure de 3 à 4 semaines (Jondreville et Dourmad, 2005). Cette mobilisation est très rapide au regard de la vitesse de renouvellement de l'os en situation d'équilibre qui est évaluée à 10 % par an en moyenne chez l'Homme adulte (Kenkre et Bassett, 2018) avec des différences importantes selon le type d'os (os cortical : 4 % *vs.* os spongieux : 25 % ; Lefèvre, 2016). La résorption de l'os s'accroît pendant la lactation (van Riet *et al.*, 2016), dès lors que la capacité maximale d'ingestion de la truie est atteinte plus tôt que le pic de lactation. Quand elle est provoquée par un déficit en calcium ou en phosphore, il s'ensuit inexorablement la libération de l'autre élément.

■ 1.2. Rôle physiologique

Le calcium ionisé (Ca^{2+}) est la forme physiologiquement active du calcium. Cette forme libre du Ca^{2+} ne représente que 0,5 % de la totalité du calcium de l'organisme. La fraction de calcium ionisée ou liée aux protéines (notamment l'albumine) dépend du pH sanguin, le Ca^{2+} se liant aux sites des protéines portant une charge négative, en compétition avec les ions H^+ . De nombreux mécanismes sont impliqués dans la régulation (homéostasie) de la teneur

plasmatisque en Ca^{2+} (Pointillart, 1984 ; Jongbloed *et al.*, 1999 ; González-Vega et Stein, 2014). Ils reposent sur l'activation ou non du transport actif impliqué dans l'absorption intestinale, sur l'excrétion rénale et sur l'équilibre entre accretion et résorption osseuse (figure 1).

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. Il est par exemple un des composants des complexes activés dans les différentes étapes de la coagulation sanguine. Seule la forme ionisée Ca^{2+} peut traverser les membranes plasmiques. 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. D'après Pérez (1978) et Suttle (2010), la séquence d'apparition des signes cliniques provoqués par une carence aigüe en calcium chez la truie peut être comparée à celle observée chez la vache qui déclare une fièvre après la mise bas, appelée « fièvre de lait », à cause d'une carence en calcium, et dont les signes sont aggravés par une carence en magnésium jusqu'à une crise de tétanie.

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 provoquer 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. Néanmoins, 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 transfert de calcium provenant du spermatozoïde ou du milieu extracellulaire est également avancée par les mêmes auteurs.

2. Absorption intestinale du calcium

L'efficacité de l'utilisation digestive des minéraux dépend de leur solubilité, qui dépend du pH des contenus digestifs, et de la régulation de l'absorption intestinale, toutes deux confondues dans la notion de digestibilité (Pérez, 1978).

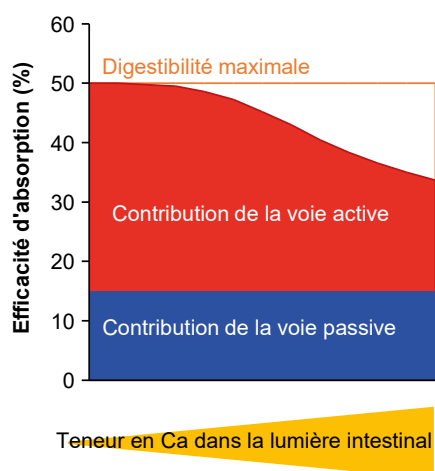
■ 2.1. Mécanismes

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, selon un mécanisme en 3 étapes (canaux d'absorption du calcium de la muqueuse intestinale, transport du calcium dans la cellule, libération dans la circulation sanguine). Chez l'Homme, il peut contribuer jusqu'à 60 % de l'absorption intestinale du calcium en situation d'apport conforme aux recommandations (Fleet et Schoch, 2010).

■ 2.2. Régulation

La diffusion passive est une voie paracellulaire non saturable qui intervient même en situation d'apports élevés en calcium (figure 2). Elle dépend du gradient de concentration en calcium entre la lumière intestinale et le plasma (Valdigué, 2000). L'essentiel de la régulation de l'absorption liée à la couverture du besoin est attribué à la voie active. Celle-ci est un processus

Figure 2. Contribution des voies d'absorption passive ou active à l'efficacité totale de l'absorption du calcium (sur la base d'une digestibilité maximale du calcium ingéré supposée à 50 %), d'après Fleet et Schoch (2010)



saturable dont la contribution à l'absorption totale est majeure en situation d'apports alimentaires faibles ou modérés, relativement au besoin. À l'inverse, en situation d'apports élevés, la voie passive devient prépondérante dans l'absorption du calcium supplémentaire ingéré (Fleet et Schoch, 2010).

Différents mécanismes d'absorption active du calcium sont proposés (Fleet et Schoch, 2010), dont le plus fréquemment décrit est celui de la diffusion facilitée sous l'action du calcitriol. Une diminution de la teneur en Ca^{2+} 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 $1,25\text{-(OH)}_2\text{D}_3$ (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 en activant 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 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$.

De même que pour le phosphore, plus les apports alimentaires augmentent et approchent du besoin, moins

l'absorption marginale (quantité de Ca absorbée par unité de Ca supplémentaire ingérée) est élevée, et la proportion totale de calcium absorbée diminue. Du fait de ces régulations, la digestibilité apparente du calcium dépend du niveau d'apport relativement au besoin.

■ 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 du calcium en augmentant la sensibilité intestinale au calcitriol (Fleet et Schoch, 2010). 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 du calcium. Après la mise bas, la prolactine prend le relais comme cela a été mis en évidence chez la femme (Kovacs, 2005) et la rate (Fleet et Schoch, 2010). À l'inverse, le cortisol inhibe l'absorption intestinale du calcium (Weiler *et al.*, 2003). Le rôle potentiel d'autres hormones telles que la leptine n'est pas encore confirmé (Breves *et al.*, 2010).

■ 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 chélatés avec les phosphates et/ou les phytates (ou phosphore phytique). De même, un excès de phosphore dans le tube digestif 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 d'hypocalcémie, 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. Il intervient en synergie avec la PTH dans l'augmentation de l'excrétion rénale du phosphore et diminue son absorption intestinale *via* une réduction de la synthèse du calcitriol (Bergwitz et Jüppner, 2010). Cela se répercute donc aussi sur les capacités d'absorption du calcium.

Quand les apports en calcium sont réduits afin d'accroître la digestibilité du phosphore et réduire les rejets de cet élément, ils peuvent ainsi s'avérer insuffisants pour la minéralisation osseuse. En effet, l'équilibre phospho-calcique est déterminant pour l'accrétion osseuse puisque le dépôt osseux se fait avec le respect strict de l'équilibre Ca/P de la trame osseuse. Une carence en calcium entraîne alors une augmentation des rejets en phosphore par la voie urinaire en raison de son implication moindre dans l'accrétion osseuse (Létourneau-Montminy *et al.*, 2012).

3. Système nutritionnel utilisé en formulation des aliments

Les tables INRA-CIRAD-AFZ (2017) de valeurs chimiques et nutritionnelles des différentes matières premières utilisées pour formuler les aliments des porcs permettent de raisonner l'apport en phosphore sur la base de la digestibilité fécale apparente, décrite par le Coefficient d'Utilisation Digestive (CUD). L'expression du besoin sur la base de la teneur en élément digestible apparent implique que les pertes endogènes fécales doivent être considérées comme une composante du besoin d'entretien (Jondreville et Durmad, 2005). Une autre approche est utilisée dans les tables NRC (2012) et CVB (2018), à savoir la digestibilité fécale standardisée qui est obtenue après avoir pris en compte les pertes endogènes basales liées à l'ingestion de matière sèche mais pas les pertes endogènes spécifiques (liées aux matières premières) en raison d'un manque de

données disponibles actuellement et de problèmes d'additivité. Les pertes endogènes basales fécales étant prises en compte dans l'évaluation du phosphore apporté par les matières premières, elles ne doivent alors pas être considérées comme une composante du besoin d'entretien. L'utilisation de l'un ou de l'autre mode d'expression du phosphore digestible modifie peu le classement des principales matières premières mais les deux approches ne peuvent pas être combinées, aussi la formulation doit-elle être réalisée avec l'une ou l'autre. Les valeurs de phosphore digestible considérées dans cet article sont celles issues des tables INRA-CIRAD-AFZ (2017). En supposant que l'activité phytasique endogène des matières premières est inactivée (par exemple lors de la granulation), il est possible de raisonner les apports en phosphore digestible (P_{dig}) dans la formule de façon additive avec les valeurs des tables INRA-CIRAD-AFZ (2017).

Pour le calcium, seules des teneurs moyennes en calcium total (Ca_{total}) sont présentées dans les tables. Les sources de calcaire sont les principales pourvoyeuses de calcium dans l'aliment. Cependant les tables ne distinguent pas le gisement d'origine. Or la comparaison de différentes sources de calcaires (oolithique, à rudiste, calcitique, dolomitique...) met en évidence des différences non seulement sur la teneur en calcium mais également sur la disponibilité de ce dernier (Ross *et al.*, 1984 ; Samson *et al.*, 2013). Des travaux sont conduits aux États-Unis (Université de l'Illinois et de Purdue) pour développer un système de digestibilité standardisée du calcium permettant de mieux caractériser les apports des différentes matières premières (Zhang *et al.*, 2016 ; González-Vega et Stein, 2016 ; Lee et Stein, 2020). Il se rapproche de la démarche mise en œuvre sur les acides aminés au niveau iléal (Stein *et al.*, 2007). Cependant, l'influence du niveau de couverture du besoin sur la régulation de l'absorption et par conséquent sur les valeurs de digestibilité reste un problème à formaliser. Par ailleurs, les connaissances disponibles sur la caractérisation des pertes endogènes sont insuffisantes. Du fait de ces différentes limites, en pratique il n'est

pas possible d'envisager de raisonner l'apport en calcium sur une base digestive actuellement.

4. Critères d'évaluation du besoin en calcium

Pendant l'engraissement, indépendamment des conditions d'ambiance ou de statut sanitaire, une chute d'appétit des porcs peut parfois conduire à suspecter rapidement une carence en phosphore (Gonzalo *et al.*, 2014), même si ce n'est pas systématique (Misiura *et al.*, 2020). Ce critère ne peut cependant pas être utilisé pendant la gestation puisque les animaux sont alimentés de façon rationnée (encadré 2). L'étude du besoin en minéraux de la truie 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).

Étant 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. D'une façon générale, l'approche empirique des besoins par des essais dose-réponse présente l'inconvénient d'aboutir à des conclusions qui dépendent des critères étudiés (gain de poids, efficacité alimentaire, minéralisation osseuse maximale...), des contraintes de formulation de l'aliment (encadré 3), voire d'interactions avec d'autres composants de l'aliment. Chez le porc en croissance, la quantification du besoin minéral fondée sur un degré de minéralisation osseuse maximale peut conduire à des niveaux d'apports très élevés que certains auteurs considèrent même extravagants (Suttle, 2010). Chez la truie, en revanche, atteindre cet objectif de minéralisation maximale (10 %, Frandson *et al.*, 2009) en début de carrière reproductrice est d'un intérêt majeur (Nimmo *et al.*, 1981). Il s'agit de préparer un squelette solide en début de carrière, qui puisse contribuer à la longévité dans le troupeau. Chez la truie gravide, il s'agit de reconstituer les réserves après des phases de mobilisation.

La densité osseuse peut être caractérisée de façon non invasive par tomographie (Monziols *et al.*, 2014) ou par absorptiométrie biphotonique à rayons X (Kipper *et al.*, 2015).

Encadré 2. L'alimentation des truies gravides.

Gestation de la truie

Après une gestation d'environ 115 jours, les truies dites « hyperprolifiques » (*i.e.* issues de schémas de sélection génétique très prolifiques) mettent bas des portées de 16 porcelets en moyenne (vs. 11 il y a 30 ans, données GTTT IFIP <https://www.ifip.asso.fr/fr/resultats-economiques-gttt-graphique.html>).

Rationnement de la truie gestante

La truie gestante est alimentée de façon rationnée pour éviter qu'un état de réserve excessif à la fin de la gestation complique le déroulement de la mise bas et limite l'appétit pendant la lactation.

Alimentation suivant un plan dit « en U »

Le développement de la portée intervient principalement pendant le dernier tiers de la gestation. Pendant cette période, l'augmentation des besoins est exponentielle et ceux-ci sont d'autant plus importants que la prolificité est élevée (Tokach *et al.*, 2019). Aujourd'hui, avec 16 porcelets par portée voire plus, presque toutes les truies sont alimentées suivant un plan dit « en U » avec des apports nutritionnels élevés pendant les 2-3 dernières semaines de gestation, et des apports pendant le premier mois de gestation d'autant plus élevés que la quantité de réserves à (re)constituer est importante après la lactation précédente.

Élevage en individuel ou en groupe, et individualisation de l'alimentation

Une alimentation à la carte est facilitée par un élevage en stalle individuelle pendant le premier mois de gestation. En revanche, à partir du début du deuxième mois de gestation jusqu'à l'entrée en maternité, environ une semaine avant la date de mise bas prévue, les truies sont élevées en groupe et, selon le système d'alimentation utilisé, l'individualisation de la ration peut être plus compliquée à mettre en œuvre.

Encadré 3. Formulation des aliments.**Alimentation biphasé des truies : aliment de gestation et aliment de lactation**

Dans la plupart des élevages, deux aliments sont utilisés pour nourrir les truies. L'aliment de gestation est distribué à partir du sevrage des porcelets jusqu'à l'entrée en maternité ou la mise bas suivante selon le nombre de silos disponibles. L'aliment de lactation est distribué ensuite jusqu'au sevrage qui intervient après 3 ou 4 semaines de lactation. Ces deux aliments doivent être formulés de façon à couvrir les différents besoins des animaux à chaque stade, selon le niveau de performance observé dans l'élevage.

Contraintes de formulation des aliments

Un ensemble de contraintes successives est appliqué pour optimiser les formules d'aliment, c'est-à-dire ajuster les taux d'incorporation des matières premières au moindre coût tout en respectant les caractéristiques nutritionnelles attendues. Ainsi, outre les limites d'incorporation fixées pour certains ingrédients de la formule (tables de valeurs des aliments IFIP-Arvalis-Unip-Cetiom, 2002), des valeurs minimales et/ou maximales sont renseignées successivement pour les critères nutritionnels suivants :

- teneur en énergie nette (EN),
- teneur en lysine digestible (LYS_{dig}), acide aminé limitant primaire dont la teneur est raisonnée sur la base d'un rapport avec l'EN,
- teneurs minimales des autres acides aminés essentiels qui dépendent de la teneur en LYS_{dig} sur la base du concept de la protéine idéale,
- teneur maximale en P_{total} pour respecter les contraintes environnementales (Dourmad *et al.*, 2015),
- teneur minimale en P_{dig} en intégrant le mode de présentation, *i.e.* sous forme de farine (avec des phytases endogènes actives) ou après un traitement thermique (granulation) qui provoque leur inactivation,
- teneurs minimales et maximales en Ca_{total} qui dépendent de la plage de valeurs du rapport Ca_{total}/P_{dig} .

D'autres critères tels que la teneur en parois végétales ou le bilan électrolytique sont également pris en compte. Les valeurs nutritionnelles moyennes des matières premières utilisées dans les aliments des truies sont disponibles dans les tables INRA-CIRAD-AFZ (2017) ; elles peuvent être ajustées aux caractéristiques chimiques des lots rendus à l'usine ou à l'élevage avec le logiciel Evapig® (<https://fr.evapig.com/>).

Ces méthodes sont utilisées dans les travaux conduits *in vivo* chez le porc en croissance. Chez la truie, plusieurs difficultés se présentent en relation *i)* avec le gabarit de l'animal qui impose l'utilisation d'un équipement *ad hoc*, *ii)* avec l'utilisation d'anesthésiants pour la sédation lors de la mesure *in vivo* (Kaliszewski, 2019) ainsi *iii)* qu'avec les effets potentiellement tératogènes des rayons X sur les fœtus notamment lorsque les doses reçues s'accumulent au cours de la carrière reproductive (Yoon et Slesinger, 2020). Toutefois, si des mesures étaient réalisées dans un cadre expérimental chez des truies prévues pour être réformées du troupeau, 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 de nombreuses années avec des isotopes radioactifs (^{32}P et ^{45}Ca) ou des isotopes stables (^{44}Ca apporté sous forme de

$CaCO_3$ ou ^{42}Ca sous forme de $CaCl_2$) et nécessitant une quantification par spectrométrie de masse (Guéguen et Rérat, 1967) sont aujourd'hui difficiles à mettre en œuvre du fait de l'évolution de la réglementation. Des méthodes alternatives d'analyse du statut minéral sont développées, fondées sur l'étude de biomarqueurs sanguins (Narcy, 2013). À défaut d'évaluer le degré de minéralisation osseuse, ces biomarqueurs, qui sont des molécules discriminantes du statut minéral de l'animal, permettent d'évaluer l'intensité de l'accrétion osseuse (phosphatase alcaline osseuse, ostéocalcine, propeptide C- ou N-terminal du collagène de type I) ou de la résorption osseuse (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 (Shetty *et al.*, 2016). À ce jour, ils ne sont encore considérés que comme des indicateurs qualitatifs du statut minéral.

5. Modélisation des besoins quotidiens en calcium

Le modèle proposé pour l'estimation du besoin en calcium total 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 (figure 2). Les besoins sont estimés par une approche factorielle (encadré 4) qui consiste, d'une part, à distinguer pour chaque stade physiologique (*i.e.*, gestation ou lactation) les composantes du besoin et, d'autre part, à prendre en compte des facteurs de variation de ces composantes. Selon le compartiment considéré, des hypothèses de relations étroites entre les masses protéiques et minérales déposées, ou entre minéraux, sont utilisées. Ce modèle intègre les approches développées antérieurement pour le calcul des besoins en phosphore par Jondreville et Dourmad (2005), intégré dans le modèle InraPorc, et en calcium par Pérez (1978), puis Moinecourt et Priymenko (2006).

■ 5.1. Besoin d'entretien

Le besoin d'entretien représente les pertes endogènes non productives inévitables, c'est-à-dire les pertes urinaires liées au métabolisme de base, ainsi que les pertes endogènes digestives (basales et spécifiques). Il est supposé être proportionnel au poids ainsi que proposé initialement par Pérez (1978). Dans notre modèle, le besoin d'entretien est supposé proportionnel au poids vif total de la truie, *i.e.* poids du conceptus (placenta, liquides placentaires et fœtus) inclus pendant la gestation (tableau 1, équations 6 et 7) car, en pratique, il n'est pas possible de les distinguer lors d'une pesée réalisée au cours de cette période. Le poids vif total de la truie est minoré de 4 % pour tenir compte des contenus digestifs. Ce facteur 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 qui pèsent, respectivement, 150 et 300 kg, mais est à mettre en relation avec l'évolution vers des

Encadré 4. Modèles de calcul factoriel des besoins nutritionnels.**Modèles de calcul factoriel des besoins nutritionnels**

Ces modèles sont utilisés pour déterminer les besoins en énergie, acides aminés et minéraux des animaux en fonction d'objectifs de performance, en tenant compte des effets du milieu d'élevage. Il s'agit de modèles factoriels fonctionnant de manière dynamique.

Cette approche factorielle consiste, d'une part, à distinguer pour chaque stade physiologique (*i.e.*, gestation ou lactation) des composantes de besoin d'entretien et de besoin de production et, d'autre part, à prendre en compte des facteurs de variation de ces composantes.

Ces modèles de flux à compartiments fonctionnent de manière dynamique c'est-à-dire en tenant compte du temps, avec un pas de temps journalier.

Dans le cas du phosphore et du calcium, les flux sont généralement exprimés en éléments digestibles.

Les flux considérés concernent :

i) les dépenses d'entretien ; *ii)* les dépenses de production, à savoir, selon le stade physiologique, le développement des contenus utérins et la production de lait ; *iii)* les dépenses associées à la constitution de réserves corporelles.

Les forces motrices du modèle sont :

i) l'évolution des réserves corporelles, généralement prédites en fonction du poids vif ou des protéines corporelles (compartiment maternel) ; *ii)* la rétention dans les contenus utérins (compartiment utérin) ; *iii)* l'excrétion dans le lait.

formules d'aliments de gestation plus dilués en énergie qu'il y a une trentaine d'années, notamment par l'incorporation de sources de fibres qui conduisent à des poids de contenus digestifs plus importants (Serena *et al.*, 2008).

À court terme, l'acquisition automatique du poids vif 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 vif pendant la gestation est modélisée en tenant compte du poids initial (à l'insémination), du gain de poids maternel 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), du niveau de rationnement pendant la gestation (Dourmad *et al.*, 1996 ; encadré 5) et de l'évolution du poids du conceptus. La cinétique d'évolution du poids net de la truie (poids vif de la truie sans le poids du conceptus) dépend du plan d'alimentation (Quiniou, 2005), principalement de la cinétique des apports en énergie si l'aliment couvre les besoins en acides aminés, tandis que celle du conceptus dépend de la taille et du poids de portée (voir plus loin). Pendant la lactation,

le besoin d'entretien est calculé sur la base du poids de la truie après la mise bas (tableau 2, équations 16 et 17), sans *a priori* sur l'intensité de la perte de poids à venir, selon la quantité de réserves mobilisées dans un contexte où les quantités d'énergie ou d'acides aminés ingérées sont inférieures aux besoins (encadré 5).

Le besoin d'entretien en calcium est fixé à 35 mg/kg de poids vif par jour par Guéguen et Pérez (1981) avec, respectivement, 32 et 3 mg/kg de pertes endogènes fécales et urinaires. Cette valeur, quoiqu'ancienne, reste proche de celles estimées plus récemment par Misiura *et al.* (2018) avec une approche par méta-analyse fondée sur des études conduites sur le porc en croissance. Ces

auteurs concluent cependant à une répartition différente entre les pertes au niveau fécal et au niveau urinaire (majoritaires), répartition très variable selon les conditions expérimentales. Or, une part seulement de cette variabilité est attribuée au niveau d'apport en phosphore, ce qui incite à poursuivre l'acquisition de connaissances sur le sujet.

■ 5.2. Besoin de production pendant la gestation

Pendant la gestation, le besoin de production dépend du dépôt dans les réserves maternelles tout au long de la période, et dans les fœtus et le placenta pendant les deux derniers tiers. Ces différents compartiments sont représentés dans la figure 3 pour estimer les flux de besoins en phosphore et en calcium. Le dépôt dans les fluides placentaires n'est pas pris en compte car très faible, à savoir 1,43 mmol/L de calcium (0,057 g/L) et 1,09 mmol/L de phosphate (0,034 g de phosphore/L) (Campbell *et al.*, 1992).

a. Dépôt maternel

La cinétique d'évolution du poids net de la truie dépend des caractéristiques initiales de la truie (âge, 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 de prise de poids de la truie.

En l'absence de données sur la lactation précédente, en particulier sur l'évolution du degré de minéralisation

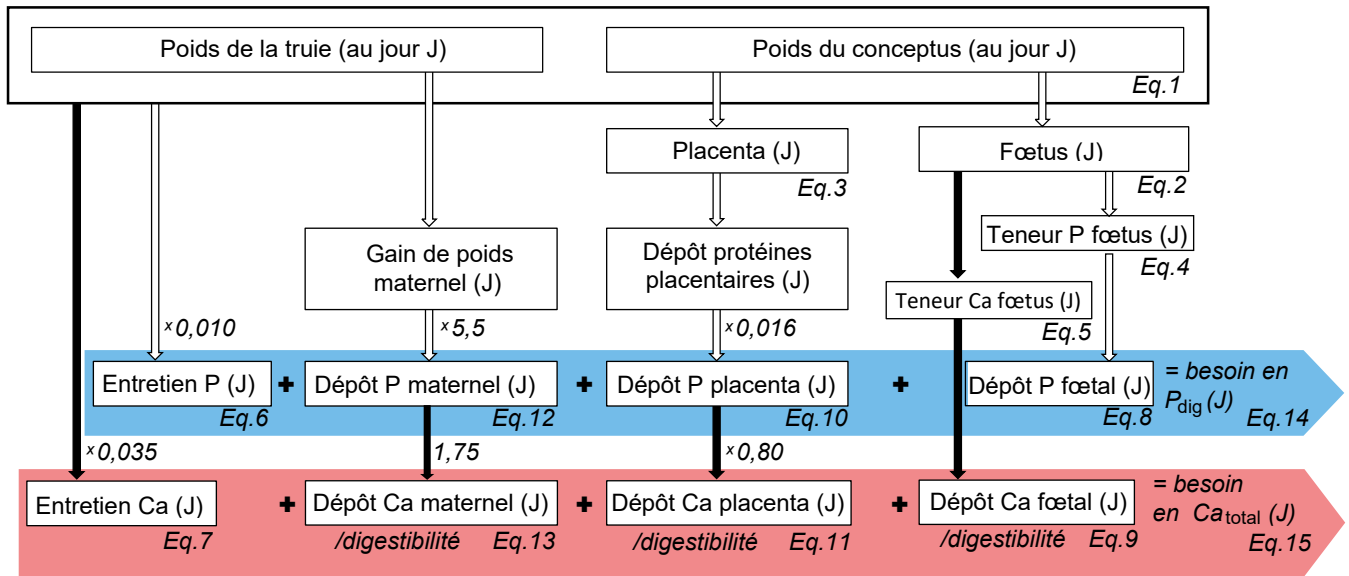
Encadré 5. L'alimentation des truies allaitantes.**Plan d'alimentation après la mise bas**

La truie est encore rationnée les jours qui suivent la mise bas. La ration augmente cependant rapidement sur 10-15 jours afin que la truie puisse rapidement être alimentée de façon libérale ou à volonté. L'objectif est de limiter ainsi le déficit nutritionnel observé pendant la lactation du fait de besoins nutritionnels très élevés pour la production de lait. Celle-ci permet à la portée qui pèse environ 25 kg à la naissance d'atteindre 110 kg 4 semaines plus tard.

Risque d'une mobilisation excessive des réserves au cours de la lactation

La lactation dure de 3 à 4 semaines. Une mobilisation excessive des réserves détériore les performances de reproduction après le sevrage et peut compromettre la longévité de la truie.

Figure 3. Modèle¹ dynamique d'estimation du besoin quotidien en phosphore digestible (en bleu) (P_{dig}) et en calcium total (en rose) (Ca_{total}) de la truie gestante.



¹ Le détail des équations (Eq.) utilisées est présenté dans le [tableau 1](#). Le calcul du besoin est effectué sur la base de la digestibilité (CUD/100) fécale apparente.

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 (Jongbloed *et al.*, 2003 ; [tableau 1](#), [équations 12 et 13](#)).

b. Dépôt placentaire

Le développement du compartiment protéique placentaire est représenté à l'aide de l'équation proposée par Noblet *et al.* (1985, [tableau 1](#), [équation 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, [tableau 1](#), [équations 10 et 11](#)).

c. Dépôt foetal

Le dépôt de minéraux dans les foetus 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 1](#), [équation 2](#)). Les teneurs en phosphore et en calcium des foetus 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 1](#), [équations 4 et 5](#)). À la naissance, elles atteignent, respectivement, 6,2 et 11,0 g/kg d'après Jongbloed *et al.* (2003).

■ 5.3. Besoin de production pendant la lactation

Deux versions du modèle d'estimation du besoin pendant la lactation sont développées ici, 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 4](#)). L'exportation de phosphore dans le lait est calculée en supposant un ratio phosphore/azote de 0,196 (NRC, 2012 ; [tableau 2](#), [équations 18 et 22](#)). L'exportation de calcium est ensuite estimée à partir de l'exportation de phosphore. La revue de la littérature réalisée par Hurley (2015) indique que la teneur en phosphore dans le lait peut être comprise entre 0,87 et 1,87 g/kg et la teneur en calcium entre 1,51 et 2,54 g/kg. Les teneurs moyennes retenues par Hurley (2015) sont utilisées dans le modèle, à savoir 1,42 g/kg lait pour le phosphore et 2,0 g/kg pour le calcium ([tableau 2](#), [équations 19 et 23](#)).

■ 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 complexes 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 1](#), [équation 14](#)) ou la lactation ([tableau 2](#), [équations 20 et 24](#)). Le besoin en calcium est plus difficile à traduire dans un système commun à 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 Ca_{total} , une hypothèse de valeur de digestibilité (CUD) doit être appliquée aux composantes de production du besoin pendant la gestation ([tableau 1](#), [équation 15](#)) et la lactation ([tableau 2](#), [équations 21 et 25](#)), précisée dans la partie suivante.

6. Facteurs de variation du besoin en calcium

Le modèle décrit dans le chapitre 5 est utilisé pour étudier l'évolution des

Tableau 1. Équations de prédiction du besoin en phosphore digestible (P_{dig}) et en calcium total (Ca_{total}) pendant la gestation en fonction du stade de gestation¹.

Critère	Équation	
Poids de la truie, au jour J (kg) ^{2,3}		$PV_{truie J} =$ 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
Poids du conceptus (placenta, liquides placentaires et fœtus) au jour J (kg) ^{3,4}	(1)	$PV_{conceptus J} = (PV_{portée} \times 1,329 + 0,3) \times \exp [8,74519 - 1,59844 \times \exp (-0,05407 (J - 45)) + 0,00006 \times EM \times J + 0,09745 \times N] / \exp [8,74519 - 1,59844 \times \exp (-0,05407 (115 - 45)) + 0,00006 \times EM \times 115 + 0,09745 \times N]$ 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)
Poids des fœtus au jour J (kg) ⁴	(2)	$PV_{fœtus J} = PV_{portée} \times \exp [8,72962 - 4,07466 \times \exp (-0,03318 (J - 45)) + 0,00154 \times EM \times J + 0,06774 \times N] / \exp [8,72962 - 4,07466 \times \exp (-0,03318 (115 - 45)) + 0,00154 \times EM \times 115 + 0,06774 \times N]$
Quantité de protéines placentaires au jour J (kg) ⁴	(3)	$PROT_{placenta J} = \exp [7,34264 - 1,40598 \times \exp (-0,0625 \times (J - 45)) + 0,00759 \times J + 0,06339 \times N] / 23,8$
Teneur au jour J (g/kg fœtus) ^{5,6}	(4)	$(J \geq 10) tP_{fœtus J} = (0,0565 \times J - 0,736) / (0,0565 \times 115 - 0,736) \times 6,2$
	(5)	$(J \geq 33) tCa_{fœtus J} = (0,1244 \times J - 4,039) / (0,1244 \times 115 - 4,039) \times 11,0$
Besoin quotidien		
Entretien (g/j) ⁷	(6)	$P_{entretien J} = 0,010 \times (PV_{truie J} + PV_{conceptus J}) \times 0,96$
	(7)	$Ca_{entretien J} = 0,035 \times (PV_{truie J} + PV_{conceptus J}) \times 0,96$
Dépôt fœtal (g/j)	(8)	$dP_{fœtal J} = (PV_{fœtus J} \times tP_{fœtus J}) - (PV_{fœtus J-1} \times tP_{fœtus J-1})$
	(9)	$dCa_{fœtal J} = (PV_{fœtus J} \times tCa_{fœtus J}) - (PV_{fœtus J-1} \times tCa_{fœtus J-1})$
Dépôt placentaire (g/j) ⁵	(10)	$dP_{placenta J} = (PROT_{placenta J} - PROT_{placenta J-1}) \times 0,016$
	(11)	$dCa_{placenta J} = dP_{placenta J} \times 0,80$
Dépôt maternel (g/j) ⁶	(12)	$dP_{truie J} = 5,5 \times (PV_{truie J} - PV_{truie J-1})$
	(13)	$dCa_{truie J} = dP_{truie J} \times 1,75$
Besoin (g/j)	(14)	$P_{dig J} = P_{entretien J} + dP_{fœtus J} + dP_{placenta J} + dP_{truie J}$
	(15)	$Ca_{total J} = Ca_{entretien J} + (dCa_{fœtus J} + dCa_{placenta J} + dCa_{truie J}) / (CUD/100)$ où CUD est la digestibilité fécale apparente du Ca (%)

¹Pour une gestation supposée durer 115 j ; ²Quiniou (2019) ; ³Dourmad *et al.* (2015) ; ⁴Noblet *et al.* (1985) ; ⁵Bikker et Blok (2017) ; ⁶Jongbloed *et al.* (2003) ; ⁷Guéguen et Pérez (1981). Le jour J correspond au stade de gestation.

besoins en calcium selon différents facteurs de variation. L'absorption intestinale du calcium est supposée maximale tant que les apports ne dépassent pas les besoins (figure 2).

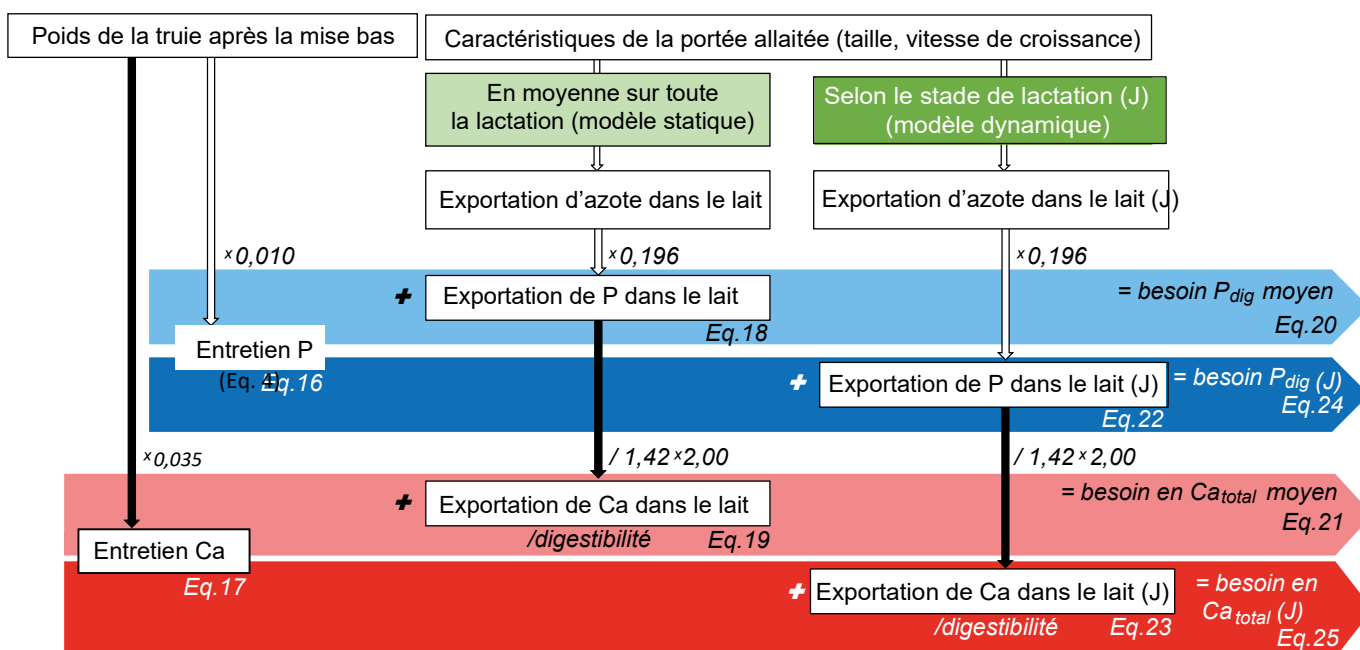
L'influence de différentes hypothèses de CUD est explorée dans le chapitre 6.1. Puis, pour étudier l'effet d'autres facteurs liés au niveau de

performance des truies, le CUD du calcium est fixé à 50 % dans le modèle, à défaut de disposer d'informations précises sur ce critère. Cette hypothèse correspond à celle précédemment retenue par Guéguen et Pérez (1981) et Jongbloed *et al.* (1999) pour évaluer le besoin en Ca_{total} et à la médiane des valeurs rapportées par González-Vega et Stein (2014).

■ 6.1. Selon l'utilisation digestive du calcium

Le niveau de besoin global dépend du CUD appliqué aux composantes de production du besoin en calcium. Un changement d'hypothèse sur ce critère impacte notamment les composantes du besoin liées aux dépôts materno-fœtaux pendant la gestation et à la

Figure 4. Modèles statiques et dynamiques¹ d'estimation du besoin en phosphore digestible (P_{dig}) et en calcium total (Ca_{total}) de la truie allaitante.



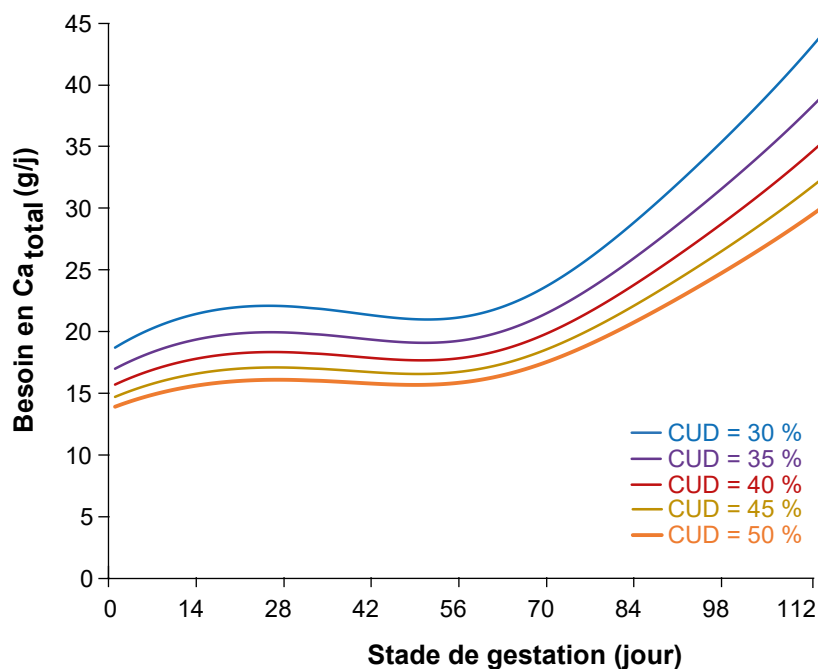
¹Le détail des équations (Eq.) utilisées est présenté dans le tableau 2. Le calcul du besoin est effectué sur la base de la digestibilité (CUD/100) fécale apparente.

Tableau 2. Calcul du besoin quotidien en phosphore digestible (P_{dig}) et en calcium total (Ca_{total}) pendant la lactation^{1,2}.

Critère	Équation	
Entretien (g/j) ²	(16)	$P_{entretien} = 0,010 \times PV_{truie} \times 0,96$
	(17)	$Ca_{entretien} = 0,035 \times PV_{truie} \times 0,96$
		où PV_{truie} est le poids net de la truie à la mise bas
Modèle statique		
Exportation dans le lait (g/j) ^{3,4,5}	(18)	$P_{lait} = (0,0257 \text{ GMQ}_{portée} + 0,42 \text{ Na}) \times 0,196$
	(19)	$Ca_{lait} = P_{lait} / 1,42 \times 2,00$
		où $\text{GMQ}_{portée}$ est le gain moyen quotidien de poids de la portée (g/j) pendant toute la lactation et Na est la taille de portée allaitée
Besoin (g/j)	(20)	$P_{dig} = P_{entretien} + P_{lait}$
	(21)	$Ca_{total} = Ca_{entretien} + Ca_{lait} / (\text{CUD} / 100)$ où CUD est la digestibilité fécale apparente (%)
Modèle dynamique		
Exportation dans le lait au jour J ^{3,4,5,6}	(22)	$P_{lait J} = (0,0257 \text{ GMQ}_{portée} + 0,42 \text{ Na}) \times (2,763 - 0,014 J) \times \exp(-0,025 J) \times \exp[-\exp(0,5 - 0,1 J)] \times 0,196$
	(23)	$Ca_{lait J} = P_{lait J} / 1,42 \times 2,00$
Besoin au jour J (g/j)	(24)	$P_{dig J} = P_{entretien} + P_{lait J}$
	(25)	$Ca_{total J} = Ca_{entretien} + Ca_{lait J} / (\text{CUD} / 100)$

¹Voir le tableau 1 pour les abréviations ; ²Guéguen et Pérez (1981) ; ³Noblet et Étienne (1989) ; ⁴NRC (2012) ; ⁵Hurley (2015) ; ⁶Dourmad et al. (2005).

Figure 5. Évolution du besoin quotidien¹ en calcium total (Ca_{total}) pendant la gestation selon la digestibilité fécale apparente (CUD) du calcium.



¹Exemple dans le cas d'une truie présentant les caractéristiques suivantes : rang de portée 2 ; poids au début de la gestation : 200 kg ; poids après mise bas : 238 kg (gain net de gestation : 38 kg) ; taille de portée : 16 porcelets ; poids de portée à la naissance : 23,4 kg ; plan de rationnement : constant à 3,0 kg d'aliment frais/j (9,00 MJ d'énergie nette/kg d'aliment frais, 12,16 MJ d'énergie métabolisable/kg).

production de lait ensuite. Cela a donc d'autant plus d'incidence sur le résultat de l'estimation du besoin en Ca_{total} que la truie est très productive. Ainsi, avec un CUD de 30 %, le besoin exprimé en Ca_{total} est plus élevé de seulement 5 g/j au début de la gestation qu'avec un CUD de 50 %, tandis que l'écart est trois fois plus élevé (15 g/j) à la fin de la gestation quand la croissance fœtale est maximale (figure 5).

■ 6.2. Selon la prolificité

a. 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 3). Pour tenir compte de l'effet de la prolificité sur le poids de portée à la naissance, les données obtenues chez 1 030 truies multipares croisées Large White × Landrace d'une unité expérimentale (station IFIP, 35850 Romillé) ont été utilisées pour modéliser la relation entre le poids vif (PV) moyen des porcelets et la taille de portée à la naissance (N) : PV, kg/porcelet = 2,184 - 0,45 N (écart-type résiduel : 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 pour la truie (gain net : + 38 kg, hors produits de la conception) (tableau 3).

Pendant le premier tiers de la gestation, la rétention de calcium au niveau fœtal est négligeable. 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 dans le placenta compris), contre seulement 0,17 g/j de plus à 84 j de gestation. À 112 j, l'écart de dépôt quotidien de calcium atteint 1,0 g/j entre des portées de 14 et de 18 (tableau 3). 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 3).

b. Conséquence sur le besoin pendant la lactation

Plus la taille de portée est élevée, plus la truie produit de lait (Étienne *et al.*, 2000) si son statut nutritionnel le permet, *i.e.* selon l'état des réserves à la mise bas et la consommation d'aliment en maternité (Noblet et Étienne, 1989 ; Quiniou, 2016). L'équation publiée par Ngo *et al.* (2012) est utilisée pour estimer la vitesse de croissance (GMQ : gain moyen quotidien) 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 Ca_{total} correspondant dans le cas où la taille de portée allaitée varie entre 10 et 16 porcelets.

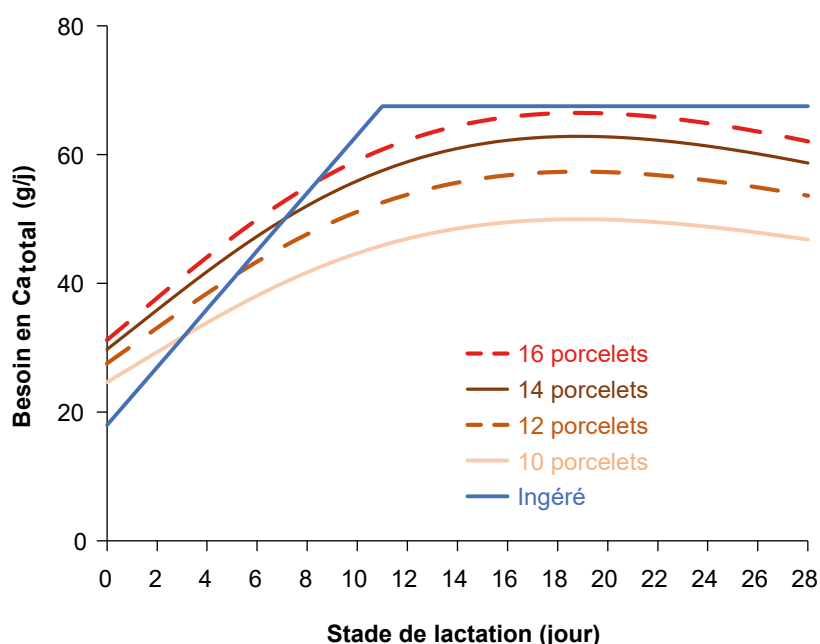
La figure 6 illustre l'évolution du besoin en calcium au cours de la lactation selon la taille de portée chez une truie en deuxième lactation qui pèse 240 kg après la mise bas. Son besoin d'entretien en calcium est de 8 g/j en moyenne. Compte tenu de la dynamique de la production de lait, le besoin d'entretien contribue à environ un tiers du besoin total au début de la lactation, mais y contribue ensuite proportionnellement deux fois moins quand le besoin pour la production de lait augmente. Au pic de production laitière (vers 19 j), le besoin quotidien en calcium atteint plus de 60 g/j dans les portées de 16 porcelets, contre moins de 50 g/j dans celles de 10 (figure 6). Au pic de lactation, la consommation de 7,5 kg/j d'un aliment lactation formulé à 9,0 g de Ca_{total} /kg permet de couvrir le besoin en calcium.

Exprimé en g/j, le besoin varie selon le poids de la truie (composante d'entretien), et selon la quantité de lait produite qui dépend du stade de lactation et de la taille de la portée (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 variabilité importante du niveau d'ingestion à un stade de lactation donné d'une truie à l'autre. Il apparaît alors difficile d'ajuster l'apport

Tableau 3. Évolution des composantes du besoin en calcium au cours de la gestation selon le stade de gestation et la prolificité.

Nombre de porcelets (nés totaux) par portée				10	12	14	16	18
Poids de la portée à la naissance (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 maternel (g/j) (M) ³	Dépôt dans le placenta et les fœtus (g/j) (PF)				
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 (g Ca _{total} /kg)		8,6	9,1	9,5	9,7	10,8

¹Évolution simulée du poids avec un plan d'alimentation constant. A 112 j de gestation, l'écart de poids brut (poids net de la truie, du placenta, des liquides placentaires et des fœtus) 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. ²Calculé en moyenne pour les cinq simulations. ³Identique pour les cinq simulations. ⁴Aliment formulé à 9,0 MJ d'énergie nette (12,16 MJ d'énergie métabolisable)/kg d'aliment frais. ⁵Besoin total = E + (M + PF)/(CUD/100).

Figure 6. Évolution¹ du besoin en calcium total (Ca_{total}) pendant la lactation selon la taille de la portée allaitée et comparaison avec la quantité de Ca_{total} ingérée².

¹Exemple dans le cas d'une truie présentant les caractéristiques suivantes : rang de portée 2 ; poids à la mise bas : 240 kg ; vitesse de croissance associée à la taille de portée allaitée : 2,40, 2,82, 3,12 et 3,31 kg/j sur une lactation de 28 jours, respectivement pour 10, 12, 14 et 16 porcelets allaités.

²Pour une quantité d'aliment ingérée maximale de 7,5 kg/j et une teneur en Ca_{total} de 9,0 g/kg.

au besoin de chaque truie quand un seul aliment est distribué à toutes les truies pendant toute la lactation. En pratique, dans ces conditions, de nombreuses truies se retrouvent en situation de carence et mobilisent 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 nutriments en fonction du besoin et de l'appétit de chaque truie chaque jour par le mélange de plusieurs aliments (Gauthier *et al.*, 2019).

7. Équilibre phospho-calcique de l'aliment

Les mécanismes de régulation de la phosphatémie et de la calcémie contribuent à l'homéostasie du rapport

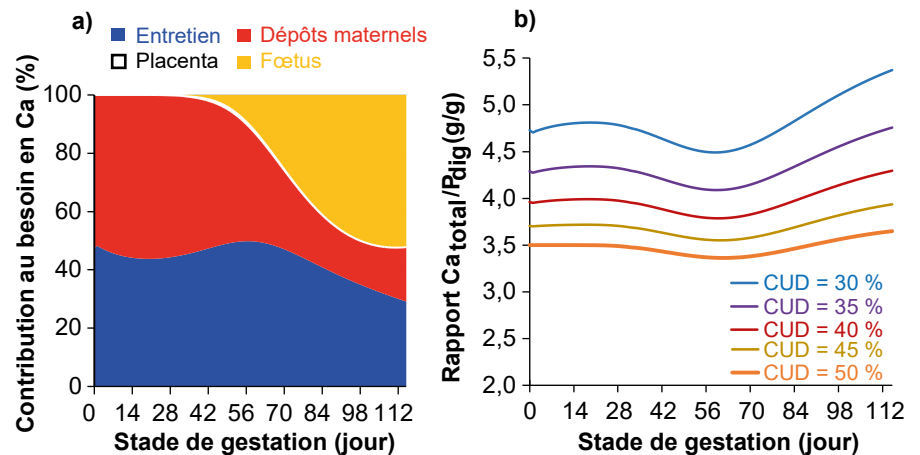
phospho-calcique dans le sang. En théorie, il faudrait surtout surveiller ce rapport après l'absorption des deux minéraux. En pratique, cela est difficile et c'est le rapport dans l'aliment qui est contrôlé. Les contraintes environnementales conduisent à formuler les aliments relativement pauvres en phosphore, ce qui peut *de facto* accentuer le risque d'apport en excès de calcium dont les sources minérales sont encore peu coûteuses. Or apporter trop de calcium à un animal nourri au besoin en phosphore le fait basculer en situation de carence pour ce dernier. La prise en compte de l'équilibre entre les apports des deux minéraux, par le rapport phospho-calcique dans l'aliment, est donc d'autant plus importante que les teneurs en calcium et en phosphore sont faibles, ou que la concentration d'un des deux éléments est faible.

Les valeurs disponibles dans les tables INRA-CIRAD-AFZ (2017) permettent de formuler l'aliment avec deux contraintes sur le phosphore : une teneur maximale en P_{total} afin de respecter les contraintes environnementales et une teneur minimale en P_{dig} pour couvrir les besoins. Le coût actuel des sources de phosphore et l'incorporation de phytases microbiennes dans l'aliment permettent le plus souvent d'atteindre une teneur en P_{total} inférieure à la contrainte 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 Ca_{total} et P_{dig} (Ca_{total}/P_{dig}). Ce rapport est calculé à partir des sorties du modèle d'estimation des besoins en Ca_{total} et en P_{dig} décrit plus haut.

■ 7.1. Pendant la gestation

Le rapport global Ca_{total}/P_{dig} dépend de la contribution relative de chaque composante au besoin total en phosphore et en calcium (figure 7a), des teneurs en Ca et P considérées pour chacune d'elles et du CUD du calcium. À partir des équations présentées dans le tableau 1, le rapport Ca_{total}/P_{dig} spécifique à chaque composante est calculé

Figure 7. Évolution pendant la gestation (a) de la contribution de chaque composante¹ au besoin global en calcium total avec un Coefficient d'Utilisation Digestive fécale apparente (CUD) du calcium de 50 % et (b) conséquence sur le rapport Ca_{total}/P_{dig} du besoin global avec différentes hypothèses de CUD du calcium.



¹ Voir le tableau 3 pour les dépôts dans les réserves, le placenta et les fœtus (pour 18 nés totaux).

ci-dessous en supposant que le CUD du calcium est de 50 % :

- i) pour l'entretien : 3,50 ;
- ii) pour le dépôt placentaire : $0,80 / (CUD/100) = 1,60$;
- iii) pour le dépôt maternel : $1,75 / (CUD/100) = 3,50$.

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 1,00 à 38 j de gestation à 3,54 à la naissance ; il atteint 3,50 après 108 j de gestation quand le besoin fœtal représente déjà 50 % du besoin total (figure 7a).

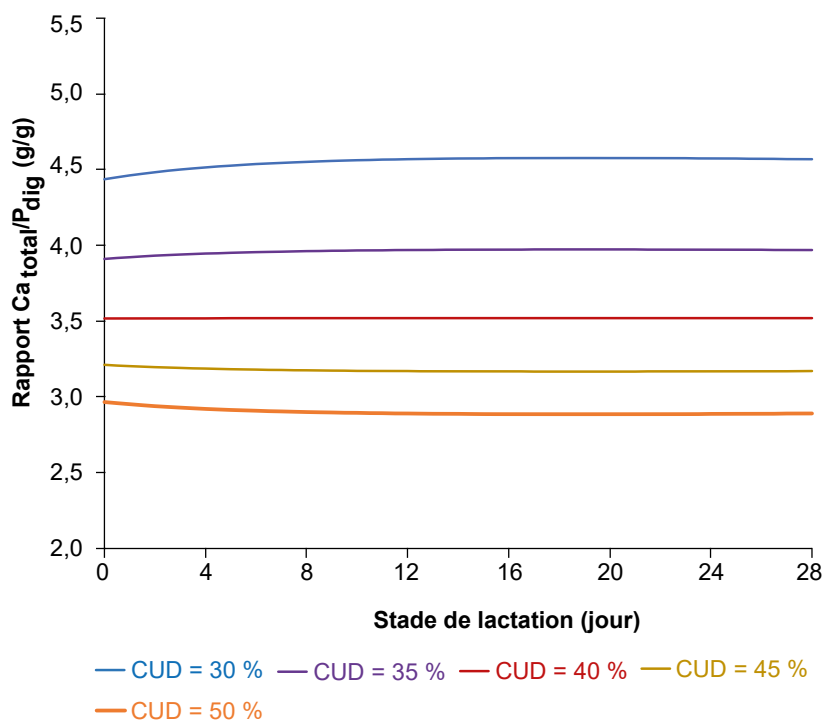
Pour des valeurs de CUD inférieures à 50 %, le rapport Ca_{total}/P_{dig} est beaucoup plus élevé pour les dépôts materno-fœtaux que pour l'entretien ce qui amplifie l'amplitude des variations du

rapport Ca_{total}/P_{dig} pendant la gestation (figure 7b). 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 de l'inflexion observée en milieu de gestation sur les courbes présentées dans la figure 7b. 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 également un rapport Ca_{total}/P_{dig} très bas. Néanmoins, au final, le rapport Ca_{total}/P_{dig} varie sur une plage de valeurs assez limitée au cours de la gestation quand le CUD est supposé proche de 50 % (figure 7b).

■ 7.2. Pendant la lactation

Les équations 18 et 22 du tableau 2 permettent de calculer que 100 g supplémentaires de gain de poids quotidien par la portée correspondent à une augmentation du besoin en P_{dig} de 0,5 g/j. La quantité de calcium supplémentaire correspondante exportée dans le lait est de 0,7 g/j (équations 19 et 23), soit un besoin supplémentaire en Ca_{total} de 1,4 g/j en supposant que le CUD est de 50 %. Le rapport Ca_{total}/P_{dig} du besoin marginal associé aux 100 g supplémentaires de gain de poids étant alors de 2,8, il oriente le rapport Ca_{total}/P_{dig} du besoin de production vers une valeur moins élevée que pour le besoin d'entretien (3,5). Dans

Figure 8. Évolution¹ du rapport entre les besoins en calcium total et en phosphore digestible (Ca_{total}/P_{dig}) pendant la lactation selon la digestibilité fécale apparente (CUD) du calcium.



¹Exemple pour une truie de rang de portée 2 qui pèse 240 kg après la mise bas et qui allaite une portée de 14 porcelets dont le gain de poids quotidien est de 3,4 kg/j en moyenne sur 28 jours de lactation.

la mesure où le rapport global dépend de la contribution de ces deux composantes 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 8). 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 et le rapport Ca_{total}/P_{dig} global ne dépend plus du niveau de production laitière.

7.3. Recommandations

Les recommandations sont délicates à établir non seulement à cause des réserves posées sur les hypothèses de digestibilité du calcium, mais également du fait que celle-ci est supposée avoir sa valeur 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. Cependant, sur la base des investigations menées avec le modèle, les plages de valeurs suggérées pour le rapport Ca_{total}/P_{dig} dans le tableau 4

apparaissent relativement étroites à un stade donné malgré des différences de rang de portée ou de prolificité. La valeur indiquée le premier mois de gestation dépend directement du mode de calcul du besoin d'entretien, qui conduit en l'occurrence ici à un rapport identique à celui du besoin pour les réserves maternelles (ratio $Ca_{total}/P_{dig} = 3,5$), tandis que le besoin lié au

Tableau 4. Plages de rapport Ca_{total}/P_{dig} suggérées¹ pendant la gestation et la lactation.

Gestation		Lactation		
Plage	3,35-3,65	Plage ⁴	2,80-3,04	
Stade de gestation		Numéro de lactation	1 ^{re}	2 ^e et suivantes
1 ^{er} mois ²	3,50	Stade de lactation		
Milieu de gestation ²	3,35-3,40	1 ^{re} semaine	2,94-3,04	2,92-3,02
Dernière quinzaine ³	3,60-3,65	Semaines suivantes	2,82-2,94	2,80-2,92

¹En supposant un rapport Ca/P de 3,5 pour le besoin d'entretien et un CUD de 50 % pour le calcium. ²Ce rapport est sous-estimé en situation de reconstitution des réserves minérales de l'os (besoin non considéré dans le modèle), à reconsidérer si les apports en phosphore sont réalisés au besoin. ³Valeur moins élevée chez les truies qui reconstituent beaucoup de réserves. ⁴Valeur qui augmente avec le poids de portée à la naissance.

développement fœtal est négligeable à ce stade. Elle n'intègre pas le besoin éventuel lié à la reconstitution de l'os après le sevrage. Pendant la lactation, la contribution de l'entretien aux besoins est moins importante, et le rapport Ca_{total}/P_{dig} recommandé dans l'aliment de lactation est moins élevé, d'autant plus que la truie produit beaucoup de lait. Le potentiel laitier inférieur de la truie pendant sa première lactation conduit à des valeurs potentiellement différentes de celles recommandées pour les truies plus âgées, mais avec un écart très faible.

La distribution d'un aliment suffisamment riche pour couvrir les besoins (en calcium et en phosphore) 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 sublimitant en calcium, la résorption de l'os qu'induit ce dernier provoque une perte de phosphore par la voie urinaire qui va à l'encontre de la réduction des rejets (fécaux) recherchée. Mieux vaut donc viser à couvrir les besoins même avec une efficacité un peu moindre.

8. Limites du modèle

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 Ca_{total} , le mode de calcul du besoin d'entretien dans le modèle devra être revu. Il est probable que les aliments seront alors formulés avec une contrainte de teneur minimale en calcium digestible pour couvrir le besoin et une contrainte de teneur maximale en Ca_{total} pour limiter les effets négatifs sur la digestibilité du phosphore. En l'absence de connaissances suffisantes pour raisonner les apports sur une base digestible, l'hypothèse d'une valeur de CUD pour raisonner les apports en Ca_{total} constitue une limite du modèle difficile à dépasser actuellement. Le CUD dépend du niveau de couverture des besoins, donc du besoin de chaque animal chaque jour. Comme le CUD diminue quand les apports augmentent et s'approchent du besoin pour un niveau d'apport donné, cela conduit en pratique à admettre que l'efficacité d'utilisation des minéraux n'est pas maximisée pour tous les animaux.

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 (encadré 4). Ce critère, associé au dépôt 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. 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, ce que les biomarqueurs du remodelage osseux permettent de confirmer. 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 critères pris en compte pour caractériser les performances de la truie.

Le degré de minéralisation osseuse n'étant pas considéré comme une entrée du modèle, pour des difficultés d'ordre méthodologique comme évoqué plus haut, il est donc considéré par défaut à son niveau maximal. Ce critère, qui traduit l'importance du compartiment « réserve Ca osseuse », doit être intégré dans le modèle pour permettre la simulation des conséquences à moyen terme d'apports carencés en minéraux sur les performances de la truie. Par ailleurs, il est également indispensable d'intégrer ce compartiment osseux pour mieux prendre en compte les phénomènes de récupération consécutive à un déficit (« déplétion-réplétion », Gonzalo *et al.*, 2018). En effet, même si les résultats obtenus chez le porc en croissance doivent encore être mieux explicités et restent à valider chez la truie, ils offrent des perspectives originales d'amélioration de l'utilisation des minéraux à tous les stades de l'élevage du porc.

Conclusion

L'utilisation d'un modèle d'estimation du besoin en calcium en complément d'un modèle d'estimation du besoin en phosphore permet de mieux raisonner les apports en calcium relativement aux apports en phosphore et l'équilibre entre ces deux minéraux dans l'aliment. La couverture des besoins individuels est une perspective à moyen ou long terme avec la mise en œuvre de l'alimentation de précision. Le premier verrou à lever pour mettre en œuvre ce type d'alimentation concerne la caractérisation des sources de calcium et leur interaction avec les technologies appliquées lors de la fabrication de l'aliment (granulométrie, traitement thermique) pour connaître leur diges-

tibilité. Le second verrou sera levé par le déploiement de capteurs et biomarqueurs 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. Néanmoins, les jeunes truies, qui sont encore en croissance et qui produisent beaucoup de lait tout en mangeant peu, présentent un risque majeur de déficit minéral. Dans un contexte d'épargne des ressources, de réduction des gaspillages et au vu des besoins atteints par certaines truies très productives, l'utilisation d'un seul aliment suffisamment concentré en nutriments pour couvrir le besoin de tous les animaux n'est pas réaliste. À court terme, une gestion des apports plus individualisée et plus dynamique autour de la mise bas, sur la base des prédictions réalisées avec le modèle, peut être envisagée pour améliorer la nutrition minérale de la truie. Individualiser les apports au début de la gestation apparaît en revanche plus risqué, sauf si un compartiment complémentaire décrivant la reconstitution osseuse post-tarissement est intégré au modèle. Cela implique d'acquérir des données sur le degré de minéralisation osseuse de la truie et sur 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 et de développer les connaissances permettant de mieux appréhender la répartition du calcium absorbé entre les fonctions liées à la reproduction et à la croissance notamment en début de carrière.

Remerciements

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

Références

- Bergwitz C., Jüppner H., 2010. Regulation of phosphate homeostasis by PTH, vitamin D, and FGF23. *Ann. Rev. Med.*, 61, 91-104. <https://doi.org/10.1146/annurev.med.051308.111339>
- Bikker P., Blok M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows. CVB Documentation Report n°59, 74 pp. <https://doi.org/10.18174/424780>
- Breves G., Schröder B., Muscher A., 2010. Luminal and endocrine factors for regulation of intestinal monosaccharide and Ca²⁺ transport. *Livest. Sci.*, 134, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.06.081>
- Campbell J., Wathen N., Macintosh M., Cass P., Chard T., Mainwaring-Burton R., 1992. Biochemical composition of amniotic fluid and extraembryonic coelomic fluid in the first trimester of pregnancy. *Br. J. Obst. Gyn.*, 99, 563-565. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.1992.tb13821.x>
- 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_por.pdf
- Courboulay C., Meunier-Salaün M.C., Pol F., Stankowiak M., 2019. BEEP : un outil à disposition des éleveurs pour objectiver le bien-être de leurs animaux. *Journ. Rech. Porcine*, 51, 37-52. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2019/bienetre/b07.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. *Journ. Rech. Porcine*, 50, 167-168. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2018/alimentation/a20.pdf>
- Crenshaw T.D., 2000. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: *Swine nutrition* (2nd ed.), Lewis A.J., Southern L.L. (Eds), CRC Press, Boca Raton, Floride, USA, 187-212.
- CVB, 2018. Feed table: chemical composition and nutritional values of feedstuffs. Spek J.W., Blok M.C. (Eds), CVB, The Netherlands, 621 pp. <http://www.cvbdiervoeding.nl/>
- De Barboza G.D., Guizzardi S., de Talamoni N.T., 2015. Molecular aspects of intestinal calcium absorption. *World J. Gastroenterol.*, 21, 7142-7154. <https://doi.org/10.3748/wjg.v21.i23.7142>
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 29, 255-262. <https://ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/a9711.pdf>
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 37, 299-306. <http://journees-recherche-porcine.com/texte/2005/05Modelis/mod0502.pdf>
- 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 Élevages et Environnement, Paris, France, 26 pp. <https://hal.inrae.fr/hal-02801680>
- Dourmad J.Y., Boudon A., Narcy A., 2020. Le phosphore dans les systèmes d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 33, 31-40. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.1.3126>
- Etienne M., Legault C., Dourmad J.Y., Noblet J., 2000. Production laitière de la truie : estimation, composition, facteurs de variation et évolution. *Journ. Rech. Porcine*, 32, 253-264. <http://journees-recherche-porcine.com/texte/2000/00txtAlim/A0013.pdf>
- 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.
- Frandsen R.D., Wilke W.L., Fails A.D., 2009. *Anatomy and physiology of farm animals*. 7th edition, Wiley-Blackwell Publisher (Ed.), Ames, Iowa, USA, 536 pp.
- Gauthier R., Guay F., Brossard L., Largouët C., Dourmad J.Y., 2019. Modélisation dynamique de l'utilisation des nutriments et des besoins individuels chez la truie en lactation. *Journ. Rech. Porcine*, 51, 117-122. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2019/alimentation/a16.pdf>
- González-Vega J.C., Stein H.H., 2014. Invited review – calcium digestibility and metabolism in pigs. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 27, 1-9.
- González-Vega J.C., Stein H.H., 2016. Digestibility of calcium in feed ingredients and requirements of digestible calcium for growing pigs. *Anim. Prod. Sci.*, 56, 1339-1344.
- Gonzalo E., Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Bernier J.F., Pomar C., 2014. Optimisation des apports de phosphore et calcium pour maximiser leur utilisation chez le porc en croissance dans un contexte de durabilité. *Journ. Rech. Porcine*, 46, 113-118. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2014/alimentation/16A7.pdf>
- 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*, Farmer C. (Ed.), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, 209-211.
- IFIP-Arvalis-Unip-Cetiom, 2002. *Tables d'alimentation pour les porcs*. IFIP (Ed.), Paris, France, 40 pp.
- INRA-CIRAD-AFZ, 2017. *Tables de composition et de valeurs nutritionnelles des matières premières pour bovins, ovins, caprins, porcs, volailles, chevaux, lapins et salmonidés*. <https://www.feedtables.com/fr>
- Inserm, 1997. Grande prématurité : dépistage et prévention du risque. In : *Physiologie de la parturition* (Chapitre 7), Expertise collective Inserm (Ed), Paris, France, 99-130. <http://hdl.handle.net/10608/204>
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2005.18.3.3523>
- Jongbloed A.W., Everts H., Kemme P.A., Mroz Z., 1999. Quantification of absorbability and requirements of macroelements. In: *A quantitative biology of the pig*, Kyriazakis I. (Ed.), CAB International, Wallingford, UK, 275-298.
- Jongbloed A.W., van Diepen J.Th.M., Kemme P.A., 2003. *Forfornormen voor varkens herziening 2003*. CVB documentatierapport n°30, 66 pp. <https://ede-pot.wur.nl/332417>
- Kaliszewski M., 2019. Is it safe to use ketamine during pregnancy? Last Updated on October 30, 2019 <https://americanaddictioncenters.org/ketamine-abuse/is-it-safe-to-use-ketamine-during-pregnancy>
- Kenkre J.S., Bassett J.H.D., 2018. The bone remodeling cycle. *Ann. Clin. Biochem.*, 55, 308-327.
- Kipper M., Pomar C., Marcoux M., Neto J.R., 2015. Évaluation de la technologie DXA pour étudier la composition des carcasses de porc et de ses coupes principales. *Journ. Rech. Porcine*, 47, 31-36. http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2015/genetique_qualite/05G.pdf
- Koppelaar R.H.E.M., Weikard H.P., 2013. Assessing phosphate rock depletion and phosphorus recycling options. *Global Environ. Change*, 23, 1454-1466.
- 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., 2020. Digestibility of calcium and phosphorus in feed ingredients fed to gestating sows and growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 98 (Suppl. 3), 111.

- Lefaucheur L., 2010. A second look into fibre typing—relation to meat quality. *Meat Sci.*, 84, 257-70.
- Lefèvre E., 2016. Caractérisation multimodale des propriétés de l'os cortical en croissance. Thèse, Université Aix-Marseille, France, 127 pp.
- 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., Lovatto P.A., Pomar C., 2014. Apparent total tract digestibility of dietary calcium and phosphorus and their efficiency in bone mineral retention are affected by body mineral status in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 92, 3914-3924.
- 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.
- Misiura M.M., Filipe J.A.N., Walk C.L., Kyriazakis I., 2018. Do not neglect calcium: a systematic review and meta-analysis (meta-regression) of its digestibility and utilisation in growing and finishing pigs. *Br. J. Nutr.*, 119, 1207-1219.
- Misiura M.M., Filipe J.A.N., Walk C.L., Kyriazakis I., 2020. How do pigs deal with dietary phosphorus deficiency? *Br. J. Nutr.*, 124, 256-272.
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 46, 45-50. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2014/genetique/10Q2.pdf>
- Narcy A., 2013. Évaluation du statut minéral chez le porc. *Journée Technique BNA*, 15/11/2013, Châteaubourg. <https://hal.inrae.fr/hal-02802969>
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 44, 195-196. <https://ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/ap7jrp44.pdf>
- Nimmo R.D., Peo Jr E.R., Crenshaw J.D., Moser B.D., Lewis A.J., 1981. Effect of level of dietary calcium-phosphorus during growth and gestation on calcium-phosphorus balance and reproductive performance of first litter sows. *J. Anim. Sci.*, 52, 1343-1349. <https://doi.org/10.2527/jas1981.5261343x>
- Noblet J., Etienne M., 1989. Estimation of sow milk nutrient output. *J. Anim. Sci.*, 67, 3352-3359.
- 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.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine. 11th edition. National Academies Press (Ed.), Washington D.C., USA, 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.
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 37, 187-194. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2005/05Alim/a0503.pdf>
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 48, 207-312. <https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/jrp2016-bea-quiniou.pdf>
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 51, 123-128. <https://ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/a17.pdf>
- Quiniou N., Boudon A., Dourmad J.Y., Moinecourt M., Priymenko N., Narcy A., 2019. Modélisation du besoin en calcium et variations du rapport phosphocalcique de l'aliment selon le niveau de performance de la truie reproductrice. *Journ. Rech. Porcine*, 51, 141-153. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2019/alimentation/a20.pdf>
- Ross R.D., Cromwell G.L., Stahly T.S., 1984. Effects of source and particle size on the biological availability of calcium in calcium supplements for growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 59, 125-134.
- 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. *Journ. Rech. Porcine*, 45, 201-202. <http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2013/alimentation/JRP-2013-alimentation20.pdf>
- Serena A., Hedemann M.S., Bach Knudsen K.E., 2008. Influence of dietary fiber on luminal environment and morphology in the small and large intestine of sows. *J. Anim. Sci.*, 86, 2217-2227.
- Shetty S., Kapoor N., Bondu J.D., Thomas N., Paul T.V., 2016. Bone turnover markers: emerging tool in the management of osteoporosis. *Indian J. Endocr. Metab.*, 20, 846-852.
- 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. CABI (Ed). Wallington, 587 pp. http://www.ucv.vt.edu/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Produccion_Animal/Minerals_in_Animal_Nutrition.pdf
- Tokach M.D., Menegat M.B., Gourley K.M., Goodband R.D., 2019. Review: nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow with an emphasis on amino acid requirements. *Animal*, 13, 2967-2977.
- Valdigué P., 2000. Métabolisme phosphocalcique. In: *Biochimie clinique* (chapitre 3), EMI (Ed). Cachan, France, 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.
- van Riet M.M.J., Millet S., Liesegang A., Nalon E., Ampe B., Tuytens F.A.M., Maes D., Janssens G.P.J., 2016. Impact of parity on bone metabolism throughout the reproductive cycle in sows. *Animal*, 10, 1714-1721.
- Weiler U., Finsler S., Claus R., 2003. Influence of cortisol, gonadal steroids and an energy deficit on biochemical indicators of bone turnover in swine. *J. Med. Vet. A*, 50, 79-87.
- Welfare Quality, 2009. Welfare Quality® assessment protocol for pigs (sows and piglets, growing and finishing pigs). Welfare Quality® Consortium, Lelystad, The Netherlands, 123 pp.
- Yoon I., Slesinger T.L., 2020. Radiation exposure in pregnancy. [Updated 2020 Jul 10]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021 Jan. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK551690/>
- Zhang F., Ragland D., Adeola O., 2016. Comparison of apparent ileal and total tract digestibility of calcium in calcium sources for pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 96, 563-569. 1

Résumé

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 en pratique les besoins en calcium de la truie reproductrice sur la base des connaissances disponibles, beaucoup plus limitées pour cet élément que pour le phosphore. Le modèle ne peut pas être utilisé pour simuler les effets d'une carence en l'apport de l'un ou l'autre minéral en raison des difficultés d'évaluation du degré de minéralisation osseuse qui conduisent à ne pas prendre en compte ce critère. Les tables de valeurs nutritionnelles des matières premières 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. Ces réserves étant posées, le modèle est utilisé pour quantifier le besoin en calcium selon le stade physiologique de la truie et son niveau de production (prolificité, production de lait).

Abstract

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

Due to the relative high mineral phosphate cost and the 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 mineral sources are relatively cheap, and the dietary calcium level 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. Due to difficulties in the assessment of the degree of bone mineralization in practice, the present version of the model cannot be used to simulate consequences of inadequate supplies of calcium or phosphorus. Phosphorus can be supplied on a digestible basis with reference to tables of nutritive values of feedstuffs, but this is presently not the case for calcium. Consequently, different hypotheses for calcium digestibility are used in the model, which will need to be updated (as well as the definition of the maintenance requirement). Given these limitations, the model is used to investigate the effect of physiological stage and productivity level (prolificacy, milk production) on the daily requirement of calcium.

QUINIOU N., BOUDON A., DOURMAD J.-Y., MOINECOURT M., PRIYMENKO N., NARCY A., 2021. Modélisation du besoin en calcium de la truie reproductrice et variation du rapport phosphocalcique des aliments selon le niveau de performance. INRAE Prod. Anim., 34, 61-78.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.1.4723>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.