

Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Liste des abréviations	xi
Remerciements.....	xiii
Avant-propos.....	xvii
Introduction	1
CHAPITRE 1 Revue des travaux antérieurs	5
1.1 Le phosphore et le calcium dans l'alimentation des porcs	7
1.1.1 Sources de phosphore et de calcium.....	7
1.1.2 Utilisation du phosphore et du calcium par l'animal.....	9
1.1.3 Flux de phosphore et de calcium	10
1.1.3.1 Les sites d'absorption.....	10
1.1.3.2 Les mécanismes d'absorption	10
1.1.3.3 Les facteurs qui influencent l'absorption de P et de Ca.....	11
1.1.4 Homéostasie	13
1.1.4.1 La régulation phosphocalcique	14
1.1.5 Apports alimentaires en phosphore et en calcium chez le porc.....	17
1.1.5.1 Besoins	17
1.1.5.2 Teneurs en phosphore et en calcium des matières premières.....	19
1.2 L'ostéochondrose	23
1.2.1 Définition.....	23
1.2.2 Période de susceptibilité	25
1.2.3 Les zones à risque.....	26
1.2.4 Facteurs qui prédisposent à l'ostéochondrose	27
1.2.4.1. Âge, croissance rapide et stratégies alimentaires.....	27
1.2.4.2. Déséquilibres phosphocalciques	28
1.2.4.3 Génétique et facteurs environnementaux	29
1.2.5 Méthodes de détection	30
1.2.5.1 Détection sur l'animal vivant.....	30
1.2.5.2. Détection après l'abattage.....	31
1.3 Liste des ouvrages cités.....	33

CHAPITRE 2 Estimation des besoins de phosphore et de calcium chez le porc de 25 à 50 kg de poids vif.	39
Résumé	43
Abstract	45
2.1 Introduction	47
2.2 Matériel et méthodes	47
2.2.1 Essai préliminaire	47
2.2.2 Essai principal	47
2.2.2.1. Aliments expérimentaux	47
2.2.2.2. Dispositif expérimental et mesures	48
2.3 Résultats et discussion	48
2.3.1 Essai préliminaire	48
2.3.2 Essai principal	49
2.4 Conclusions	50
2.5 Liste des ouvrages cités	51
2.6 Matériel complémentaire	53
CHAPITRE 3 Impact de déséquilibres phosphocalciques sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition	55
Résumé	59
Abstract	61
3.1 Introduction	63
3.2 Matériel et méthodes	64
3.2.1 Animaux et dispositif expérimental	64
3.2.2 Aliments expérimentaux	64
3.2.3. Analyses de laboratoire	65
3.2.4. Analyses statistiques	66
3.3 Résultats	67
3.3.1 Phase 2	67
3.3.2 Phase 3	68
3.4 Discussion	72
3.5 Conclusions	75
3.6 Liste des ouvrages cités	77
Conclusion et perspectives	81
ANNEXES	85
Annexe 1. Résumé de l'essai préliminaire présenté au congrès 2015 du 13th Digestive Physiology of Pigs, Kliczków, Pologne	87
Annexe 2. Affiche présentée au congrès 2015 du 13th Digestive Physiology of Pigs, Kliczków, Pologne	88
Annexe 3. Affiche présentée aux 48^e Journées de la Recherche Porcine	89
Annexe 4. Article court publié pour les 48^e Journées de la Recherche Porcine	90
Annexe 5. Article long publié pour les 48^e Journées de la Recherche Porcine	92

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1. Utilisation du phosphore (P) et du calcium (Ca) selon les apports du NRC ou de l'INRA apportés durant l'essai préliminaire.....	49
Tableau 2.2. Performances des porcs et composition corporelle de phosphore (P) et de calcium (Ca) durant l'essai principal	50
Tableau 2.3. Performances et utilisation du phosphore (P) et du calcium (Ca) chez les porcs en fonction des apports recommandés en P et en Ca selon le NRC ou l'INRA durant l'essai préliminaire	53
Tableau 2.4. Performances des porcs et composition corporelle de phosphore (P) et de calcium (Ca) durant l'essai principal	54

Chapitre 3

Tableau 3.1. Aliments expérimentaux.....	66
Tableau 3.2. Performances de croissance, minéralisation osseuse et bilan phosphocalcique des porcs en fonction des apports alimentaires en P et en Ca durant la phase 2.....	70
Tableau 3.3. Performances de croissance, minéralisation osseuse et bilan phosphocalcique des porcs en fonction des apports alimentaires en P et en Ca durant la phase 3.....	71

Liste des figures

Chapitre 1

- Figure 1.1. Représentation schématique du flux de P au niveau du tractus gastro-intestinal du porc. PD; P d'origine alimentaire, PE; P d'origine endogène, S.I.; petit intestin et L.I.; gros intestin. 11
- Figure 1.2. Schéma représentant les activités cellulaires de résorption (ostéoclastes) et de formation (ostéoblastes) dans le tissu osseux. 14
- Figure 1.3. Mécanismes impliqués dans la régulation du P et du Ca dans l'organisme. 15
- Figure 1.4. Changements plasmatiques suite à la réduction séquentielle du Ca dans l'alimentation de porcs sevrés durant une période de 32 jours. 16
- Figure 1.5. Exemples de lésions d'ostéochondrose au niveau de l'articulation du coude..... 24
- Figure 1.6. Mesures prises durant le cycle reproducteur de la truie : L'évaluation de la boiterie a été faite durant le déplacement des truies entre les différents stades de gestation (L1 à L3). 25
- Figure 1.7. Schéma représentant les principales localisations d'ostéochondrose comprises à l'intérieur de l'épaule, du jarret et des pieds du porc. 26

Chapitre 3

- Figure 3.1. Carcasse de porc sur laquelle sont identifiées les sept articulations ciblées au niveau de l'épaule, du jarret et des pieds..... 65

Liste des abréviations

ADN	Acide désoxyribonucléique
ATP	Adénosine triphosphate
Ca	Calcium
CMJ	Consommation moyenne journalière
CMO	Contenu minéral osseux
CT	Calcitonine
GMQ	Gain moyen quotidien
P	Phosphore
PTH	Parathormone
PV	Poids vif
IC	Indice de consommation
OC	Ostéochondrose
OCD	Ostéochondrose disséquante

Remerciements

Mon intérêt envers la recherche a commencé à grandir lorsque j'ai travaillé en tant qu'auxiliaire de recherche au département des sciences animales pour un projet de bien-être chez les vaches laitières à mi-parcours de mon baccalauréat. J'ai adoré contribuer à l'avancement d'un projet expérimental, avoir sous ma responsabilité différentes tâches et acquérir de l'expérience sur le terrain. Après avoir obtenu mon diplôme et mon statut d'agronome, ma soif de connaissances et mon désir de relever des défis m'ont rapidement convaincue de poursuivre mes études au deuxième cycle. C'est donc après avoir travaillé un été complet aux côtés de Marie-Pierre Létourneau-Montminy que j'ai décidé de me lancer.

Les études au deuxième cycle ont été une expérience très formatrice, qui m'ont permis de grandir, tant du côté professionnel que personnel. Je peux dire avec fierté que j'ai acquis plus de confiance, d'autonomie et d'efficacité organisationnelle à travers mon parcours. J'ai pu travailler avec des personnes formidables qui ont toutes eu la patience de me transmettre leurs connaissances. Je tiens sincèrement à remercier l'équipe de professionnels avec qui j'ai eu la chance de travailler pendant ces deux dernières années : ma directrice et mon codirecteur, Marie-Pierre Létourneau-Montminy et Candido Pomar, pour leurs précieux conseils, leur écoute et les opportunités auxquelles ils m'ont permis d'accéder, telles que d'aller présenter mes résultats en Pologne et à Paris. Je remercie ensuite l'équipe de la porcherie à Lennoxville, pour leur motivation et leur dynamisme, Marcel, pour sa patience et ses talents de boucher, puis Steve Méthot et Isabelle Lachance, pour leur grande disponibilité à m'aider en statistiques. Mes amis et collègues de maîtrise méritent aussi un gros merci, tout particulièrement Enrique, Véro, Max, Hector, Ann-Sophie, René, Liliana et Lucie, pour leur soutien et toutes nos petites pauses qui m'ont permis de décompresser.

Finalement, un merci particulier à ma sœur Mélanie, avec qui j'ai cohabité durant les deux dernières années, qui m'a apporté un énorme support tout au long de mon parcours, que ce soit pour me changer les idées ou pour me motiver à travailler encore plus fort. Un dernier merci à mes parents, Mario et Maryse, qui m'ont également soutenue par leur fierté de me voir poursuivre mes études.

« Il n'y a pas de maîtrise plus grande et plus humble que celle que l'on exerce sur soi. »

Léonard de Vinci

Avant-propos

Ce mémoire contient deux chapitres rédigés sous forme d'article scientifique. Je suis l'auteure principale de ces articles, et les coauteurs sont les chercheurs impliqués dans les travaux de recherche, soit Marie-Pierre Létourneau-Montminy, ma directrice de maîtrise, et Candido Pomar, mon codirecteur. Les chapitres 2 et 3 sont adaptés des deux articles qui ont été rédigés et publiés pour les 48^e Journées de la Recherche Porcine en France au début de l'année 2016. Leur version publiée est disponible en annexe. Les deux articles seront traduits en langue anglaise et soumis pour publication dans des journaux scientifiques sous peu.

Les objectifs du mémoire sont liés aux besoins de P et de Ca chez le porc en croissance, en lien avec la minéralisation osseuse, les performances de croissance et les rejets de P dans le cadre du développement de l'alimentation de précision. Une partie de la revue de la littérature aborde également l'ostéochondrose, un problème très présent sur le terrain qui suscite de nombreux questionnements et qui est souvent associé, à tort ou à raison, à l'apport phosphocalcique. En raison des problèmes d'ostéochondrose particulièrement importants chez les porcs de lignée F1, les essais ont été réalisés avec ces animaux. Bien que de façon typique, les truies de remplacement soient alimentées avec des rations plus riches en P et en Ca que les porcs commerciaux, on considère que les résultats seront extrapolables aux porcs en croissance de lignées terminales en raison d'un contenu minéral osseux équivalent entre ces deux lignées. Le témoin positif correspond à l'aliment offert aux truies de remplacement sur le terrain par certains producteurs.

Introduction

Dans les dernières décennies, la production porcine a connu de nombreuses améliorations en matière de génétique, de santé, d'environnement et de nutrition. L'alimentation a toujours été un sujet de recherche actif étant donné qu'elle représente jusqu'à 60 % du budget des producteurs (Les Éleveurs de porcs du Québec, 2013) et qu'elle a une influence directe sur les performances de croissance de l'animal et ses rejets dans l'environnement. Le phosphore (P), nutriment essentiel au métabolisme des porcs et des plantes, peut être dommageable pour l'environnement lorsqu'il est apporté en excès des besoins des milieux récepteurs. Il a ainsi fait l'objet de nombreuses études chez le porc en croissance dans les dernières années. Il est généralement le 3^e nutriment le plus cher, après l'énergie et la protéine dans les formules alimentaires destinées au porc. Le calcium (Ca), quoique peu dispendieux, est également important à considérer dans la ration des porcs puisqu'il interagit avec le P, l'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6$) étant la principale molécule de la matrice minérale de l'os (Marieb, 2005). Chez les truies, les apports phosphocalciques sont plus grands compte tenu des besoins particulièrement plus élevés durant la phase de lactation et des conséquences d'un épuisement des réserves osseuses dues à un capital osseux insuffisant lors de la maturité sexuelle qui est difficilement réversible (Cromwell et al., 1993). Étant donné les nombreux facteurs qui influencent l'utilisation de ces deux minéraux, leurs interactions avec les autres nutriments contenus dans la ration et le peu d'information récente existant sur le besoin des cochettes et des truies plus particulièrement, la solution actuelle sur le terrain est souvent d'augmenter les apports de façon importante pour éviter les carences. Cela a d'ailleurs pu être constaté chez les porcs en croissance dans certains contextes (Ekpe et al., 2002).

L'utilisation de quantités excessives de P et de Ca dans l'alimentation des porcs soulève toutefois plusieurs questions. En effet, en plus de savoir que les excès de P ont des impacts non négligeables au niveau de l'environnement, un doute demeure à savoir si des excès de P et de Ca ne pourraient pas être reliés aux problèmes de boiterie fréquents dans les élevages porcins (Crenshaw, 2003). La boiterie est un mal persistant malgré tous les progrès réalisés grâce à la recherche. Une fréquence moyenne de 39 % chez les cochettes, et de 28 et 37 % chez les porcs en finition de 18 et 22 semaines respectivement a

récemment été rapportée dans une étude irlandaise réalisée sur 68 fermes commerciales (Quinn and Calderon, 2013). L'ostéochondrose, une atteinte articulaire dégénérative de l'animal en croissance (van Grevenhof et al., 2011), est la cause la plus fréquente des problèmes de boiterie. Les causes qui lui sont propres ne sont toutefois pas connues, alors que la maladie est très problématique. En effet, cette dernière réduit le bien-être de l'animal et mène, dans les cas les plus graves, à des réformes prématurées. Celles-ci se produisent principalement chez la truie voire la cochette, ce qui n'est pas souhaité puisqu'une truie qui n'atteint pas sa troisième parité n'est pas rentable (Wilson et Ward, 2012). Le lien souvent fait entre la minéralisation osseuse et les problèmes de boiterie amène à revoir les besoins de P et de Ca pour s'assurer d'alimenter les truies de remplacement ni en dessous ni trop au-dessus de leurs besoins.

Une multitude de facteurs sont à considérer pour fournir les quantités adéquates de P et de Ca. Il est notamment important de tenir compte du fait qu'environ 30 à 40% du P ne peut être absorbé par les porcs qui en excrètent donc beaucoup (Cromwell, 1996), même lorsque ce dernier est hautement disponible. Pour augmenter l'absorption du P et du Ca, il est essentiel de maîtriser la composition nutritionnelle des matières premières, d'optimiser leur digestibilité, de connaître précisément les besoins des porcs et enfin, d'avoir des systèmes d'alimentation permettant d'ajuster le plus précisément possible les apports nutritionnels aux besoins des animaux (Marquis, 2004). Dans cette optique, l'alimentation de précision s'avère une option intéressante pour réduire les coûts d'alimentation et les rejets de nutriments en permettant d'alimenter quotidiennement chaque porc du troupeau avec la quantité de nutriments dont il a besoin comparativement à un aliment classique de groupe administré par phase d'alimentation (Pomar et al., 2009). L'utilisation de cette technique d'alimentation repose entre autres sur l'estimation précise des besoins des animaux, et ce, de façon individuelle, ce qui représente un important changement dans notre façon d'aborder la nutrition du porc. L'établissement précis des besoins de P et de Ca est toutefois complexe car il existe plusieurs critères de réponse servant à évaluer le besoin, soit notamment la maximisation des performances de croissance et de la minéralisation osseuse, ou encore la minimisation des rejets de P dans l'environnement.

Les objectifs de la présente étude étaient donc d'étudier la réponse des porcs à différents apports de P et de Ca en termes de performances de croissance, de minéralisation osseuse et d'excrétion de P afin de déterminer les apports phosphocalciques nécessaires pour optimiser ces différents critères d'utilisation de P chez les truies de remplacement durant la période de croissance. Cette étude constitue la première étape de la détermination des besoins en P et en Ca dans le cadre de l'alimentation de précision.

Le premier chapitre de ce mémoire est une revue des connaissances actuelles sur le P et le Ca dans l'alimentation du porc et les problèmes d'ostéochondrose. Le second porte sur *l'estimation des besoins de phosphore et calcium chez le porc de 25 à 50 kg de poids vif* et le troisième sur *l'impact de déséquilibres phosphocalciques sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition*.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 1

Revue des travaux antérieurs

1.1 Le phosphore et le calcium dans l'alimentation des porcs

1.1.1 Sources de phosphore et de calcium

Le P et le Ca sont les deux minéraux les plus abondants de l'organisme des animaux. Ils sont essentiels dans l'alimentation des porcs, de la naissance à l'abattage, pour leur assurer une croissance et une minéralisation osseuse adéquates. Ils sont d'autant plus importants chez les truies compte tenu de la forte demande en ces minéraux durant les cycles de gestation et de lactation qui se succèdent et qui affectent les réserves minérales (Underwood et Suttle, 2001). Ils peuvent se retrouver sous plusieurs formes dans les aliments, mais leur choix dans l'alimentation des porcs repose principalement sur leur coût en fonction de la quantité de P utilisable par l'animal (Kiarie et Nyachoti, 2010).

Les sources de P alimentaire sont principalement d'origine végétale, minérale, ou animale (ex. : farines de poisson, d'os, de volaille, de viande ou de sang). Dans les végétaux, le P est présent sous deux principales formes, soit la forme phytique qui est organique et constituée d'un inositol qui peut fixer jusqu'à 6 groupements phosphates, ou soit la forme non phytique qui est inorganique. Elles sont retrouvées dans différentes proportions par rapport au P total, la forme phytique étant prédominante dans les matières premières d'origine végétale couramment utilisées dans les formules alimentaires destinées aux porcs (50 à 80 % du P total; Pointillart, 1994). Le P d'origine minérale et animale est pour sa part sous forme non phytique. La proportion de ces deux formes, phytique et non phytique, influence l'absorption du P de l'aliment car seules les formes inorganiques solubles sont absorbables. Ainsi, pour être absorbés par l'animal, les groupements phosphates liés au P phytique nécessitent l'action de la phytase, une enzyme qui déphosphoryle les phytates pour en libérer les groupements phosphates (Jondreville et Dourmad, 2005). Contrairement aux ruminants, les porcs n'ont pas la capacité de digérer le P phytique efficacement puisqu'ils possèdent peu d'activité phytasique endogène (Pointillart, 1998). Le P phytique contenu dans les matières premières d'origine végétale représente donc une source de P utilisable par l'animal beaucoup moins importante dans l'alimentation des porcs comparativement aux sources d'origines animale ou inorganique (NRC, 2012), qui possèdent une disponibilité pouvant s'élever au-dessus de 50 % (Kiarie et Nyachoti, 2010).

Il est possible de retrouver le P dans la nature sous forme de phosphate rocheux à partir duquel est produit l'acide phosphorique, principale source des phosphates utilisés dans les fertilisants et dans les aliments (Crenshaw, 2001). Il peut également être retrouvé en complexe avec l'oxygène sous forme de phosphate (PO_4), ou bien avec le Ca pour former des phosphates monocalciques, monobicalciques et bicalciques. Pour une meilleure digestibilité du P, sans tenir compte du facteur économique, il est recommandé d'utiliser du phosphate monocalcique au lieu du phosphate bicalcique (Jondreville et Dourmad, 2005) car il est plus soluble donc plus absorbable.

L'ajout de phytase dans la ration constitue une stratégie alimentaire aujourd'hui généralisée chez le porc et la volaille pour augmenter la digestibilité du P des matières premières d'origine végétale. La phytase a en effet la capacité de dégrader environ 50 % du P phytique alimentaire au niveau du petit intestin, augmentant ainsi l'absorption du P et diminuant par le fait même son excrétion (Selle et Ravindran, 2008). De plus, elle peut substituer une partie de la source de P inorganiquement habituellement introduite dans les rations, constituant ainsi une source de P alternative (Jondreville et Dourmad, 2005). Son efficacité varie toutefois en fonction de nombreux facteurs, dont les principaux sont 1- la concentration de phytates alimentaires et leur solubilité dans l'intestin, qui elle est fonction du pH, 2- l'activité phytasique réelle, 3- l'origine de la phytase (endogène, microbienne ou végétale) ainsi que 4- son pH optimum d'action (Selle et Ravindran, 2008). Il a également été montré, tant chez le poulet que chez le porc, qu'un rapport Ca :P élevé, soit des apports élevés de Ca jumelés avec de faibles apports de P, favorisait l'efficacité de la phytase (Driver et al., 2005).

Les sources de Ca sont pour leur part majoritairement inorganiques telles que le calcaire, le phosphate de calcium di ou monobasique et le chlorure de calcium, et sont disponibles pour le métabolisme aux alentours de 60 à 75 % (digestibilité apparente; Gonzalez-Vega et al., 2015). D'autres sources organiques contiennent également de hautes concentrations de Ca, soit les farines animales (ex. farine de viande et d'os, poudre de lactosérum), ou certaines farines de poissons. Les grains et les protéines végétales contiennent quant à eux de faibles concentrations de Ca de l'ordre de 1 % (NRC, 2012).

1.1.2 Utilisation du phosphore et du calcium par l'animal

Environ 96 à 99 % du Ca et 60 à 80 % du P corporel sont stockés dans les os, le reste circulant dans les fluides corporels, ou étant distribué dans les tissus mous dans le cas du P (Suttle, 2010). Les rôles des deux minéraux sont bien distincts à l'exception du métabolisme osseux où ils sont interdépendants, puisqu'ils forment les cristaux d'hydroxyapatite, base physique de l'os (Marieb, 2005).

Les fonctions non squelettiques du Ca, soit environ 1 % du Ca total, sont tout aussi importantes pour la survie de l'animal (Suttle, 2010). Le Ca joue entre autres un rôle de messenger secondaire dans la signalisation cellulaire, en participant à de nombreuses fonctions métaboliques, telles que la transmission de l'influx nerveux, la contraction musculaire, la perméabilité et l'intégrité des membranes cellulaires, la coagulation sanguine, l'excitation et la sécrétion de glandes endocrines, etc. (Cromwell, 1996).

Le P est situé dans toutes les cellules du corps sous forme d'acides nucléiques, de nucléotides, de phospholipides ou de composés phosphorylés (Veum, 2010). Il participe ainsi à plusieurs fonctions métaboliques, telles que le rôle d'initiateur à la synthèse protéique et d'acides aminés à l'intérieur des tissus mous, de transporteur d'acides gras ou d'énergie via l'ATP. Sous forme de phospholipides, il contribue à la fluidité et à l'intégrité des membranes cellulaires et à la myélinisation des nerfs, alors qu'en tant que composant de l'ADN, il contribue à la croissance et à la différenciation cellulaire. Il sert également de tampon acide-base et participe à la balance osmotique en tant que phosphate (Suttle, 2010).

Il est aussi important de parler du rôle de la vitamine D qui interagit également étroitement avec le métabolisme de ces deux minéraux. On la retrouve sous deux principales formes liposolubles, soit la vitamine D₂ (ergocalciférol) et la D₃ (cholécalfiérol). Une fois absorbées par l'animal, elles sont hydroxylées au niveau du foie pour former des métabolites dihydroxylés. La molécule 25-hydroxy-D₃ subit de plus une hydroxylation supplémentaire au niveau des reins et se retrouve soit sous la forme 1,25-dihydroxy-D₃, aussi appelée calcitriol, ou la forme 24,25-dihydroxy-D₃, moins active que la précédente (NRC, 2012). Ainsi, la vitamine D et ses dérivés actifs agissent sur les cellules des

muqueuses du petit intestin pour former des protéines responsables du transport actif du Ca et facilitent son absorption. De plus, elles se lient aux récepteurs responsables de l'homéostasie du P et du Ca et contribuent au maintien d'une bonne minéralisation osseuse, avec l'aide des hormones parathormone (PTH) et calcitonine (CT; NRC, 2012).

1.1.3 Flux de phosphore et de calcium

1.1.3.1 Les sites d'absorption

Afin d'être absorbés puis aptes à être véhiculés du tractus gastro-intestinal vers le système circulatoire, le P et le Ca doivent être sous leur forme ionique (Jongbloed et al., 1999) après solubilisation (Pointillart, 1998). L'absorption des deux éléments se fait principalement dans la partie proximale du petit intestin, soit le duodénum et le jéjunum. Liu et al. (2000) auraient également montré qu'une absorption de P et de Ca serait possible au niveau du caecum et du colon, particulièrement lorsque les apports en P et en Ca sont faibles, alors qu'une plus récente étude aurait montré qu'il n'y aurait aucune absorption du Ca au niveau du gros intestin (González-Vega et al., 2014).

1.1.3.2 Les mécanismes d'absorption

Le Ca soluble est véhiculé via le petit intestin par transport actif, et peut également être transporté passivement par diffusion à travers la partie distale du petit intestin et du colon (Crenshaw, 2001). Le transport actif est davantage sollicité lors d'une carence en Ca (Veum, 2010) et se fait via des protéines spécifiques liant le Ca, qui transportent ce dernier à travers la paroi intestinale (Cromwell, 1996). Selon Kornegay (1985), seulement 30 à 60 % du Ca ingéré serait absorbé, et 85 à 95 % de la quantité absorbée serait retenue.

Tout comme le Ca, le P d'origine alimentaire est absorbé dans le petit intestin par transport actif et passif suite à son ingestion, et ce de manière indépendante au Ca (Crenshaw, 2001). Le P peut aussi provenir de sources endogènes, dont les principales sont la salive, les sucs gastriques, biliaires et pancréatiques, ou les cellules nécrosées des muqueuses (Figure 1.1; Fan et al., 2001). Le P absorbé circule à travers l'estomac, le petit et le gros intestin, et peut

également circuler via le plasma et être absorbé dans l'os ou y être résorbé pour être utilisé par le métabolisme de l'animal. Le P absorbé en excès des besoins sera excrété via l'urine, alors que le P non absorbé sera excrété via les fèces (Figure 1.1). Pour toutes les catégories d'animaux, soit les porcelets sevrés, ceux à l'engraissement et les truies, environ 50 % du P ingéré est excrété dans les fèces (Jondreville et Dourmad, 2005). Il est à noter que la proportion excrétée pourrait être plus importante en élevages commerciaux (Dourmad et al., 1999) en raison des marges de sécurité pratiquées.

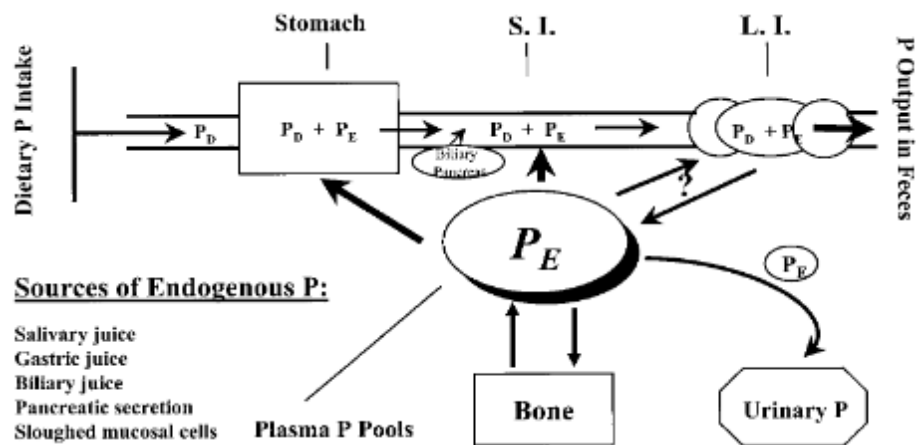


Figure 1.1. Représentation schématique du flux de P au niveau du tractus gastro-intestinal du porc. PD; P d'origine alimentaire, PE; P d'origine endogène, S.I.; petit intestin et L.I.; gros intestin.

Tiré de Fan et al. (2001)

1.1.3.3 Les facteurs qui influencent l'absorption de P et de Ca

Tel que mentionné précédemment, les quantités de P et de Ca absorbées sont variables et dépendent de plusieurs facteurs. Elles ne dépassent généralement pas 60 % de l'ingéré, même lorsque les sources de P sont très disponibles ou encore lorsque de très fortes teneurs de phytase sont ajoutées aux aliments (Weremko et al., 1997). Il est ainsi important de bien connaître les facteurs modulant l'utilisation digestive de ces minéraux.

a. *Apports et disponibilité*

Compte tenu des régulations hormonales connues du métabolisme, le taux d'absorption dépend en premier lieu de l'apport en minéraux par rapport aux besoins (Jongbloed et al., 1999), et également des quantités de P et de Ca disponibles dans l'intestin. Par exemple, lorsque les quantités disponibles sont restreintes, leur absorption est généralement plus efficace (Cromwell, 1996). De plus, tel que mentionné précédemment, certaines formes de P et de Ca, organiques versus inorganiques, seront plus facilement absorbables par l'animal. Le pH intestinal est aussi important à considérer puisqu'il peut influencer la solubilité des minéraux. Il est effectivement connu que la solubilité du Ca est meilleure en condition acide, ce qui favorise son absorption, alors qu'à l'inverse, les conditions alcalines en diminuent l'absorption (McDowell, 1992).

b. Interactions

La présence de chélates naturels dans l'aliment, tels les phytates qui ont une forte affinité avec le Ca et d'autres cations, peut réduire l'absorption du Ca (Cromwell, 1996). La présence d'autres minéraux, tels le fer, l'aluminium ou le magnésium, peut également interférer avec l'absorption du P et du Ca. Le P et certains minéraux peuvent, par exemple, former des phosphates insolubles qui en réduisent l'absorption (McDowell, 1992).

c. Rapport Ca :P

Les voies communes de régulation hormonale du P et du Ca et leur dépôt simultané au niveau osseux demandent un équilibre dans les apports alimentaires afin d'éviter de limiter l'utilisation de l'un ou de l'autre de ces minéraux. Ainsi, le rapport Ca :P ne doit être ni trop grand, ni trop petit. Selon le NRC (1998), le rapport de Ca :P total suggéré pour un régime à base de maïs et de tourteau de soya devrait se situer entre 1,1 et 1,25 :1, ou entre 2 :1 et 3 :1 si on parle en termes de Ca :P disponible. Lorsqu'on parle de digestibilité apparente du P, le rapport devrait être entre 2,5 et 3,2 (Jongbloed et al., 1999; NRC, 2012). Les notions de P disponible et de P digestible seront expliquées à la section 1.1.5.2. Pour qu'un rapport Ca :P soit adéquat, les deux minéraux doivent toutefois être apportés selon les besoins de l'animal (Viperman et al., 1974). Plusieurs chercheurs ont démontré qu'un rapport Ca :P trop élevé avec des concentrations marginales de P accentue la carence de ce dernier, limite

son absorption, et réduit par conséquent la croissance et la calcification du porc (Viperman et al., 1974; Reinhart et Mahan, 1986; Hall et al., 1991; Eeckhout et al., 1995). En effet, lorsque le rapport de Ca :P est élevé et que l'apport de P est limitant, le Ca en excès vient former des complexes insolubles avec le P dans le tractus gastro-intestinal, ce qui mène inévitablement à une absorption limitée du P et à une minéralisation osseuse réduite (Heaney et Nordin, 2002). Lorsque le P et le Ca sont tous deux en concentration plus élevée que les besoins, le rapport Ca :P est moins critique, car bien qu'administrés en excès, les deux minéraux demeurent en proportion adéquate l'un par rapport à l'autre (Viperman et al., 1974; Reinhart et Mahan, 1986). Par conséquent, l'utilisation d'un rapport Ca :P approprié est important pour maximiser l'absorption et l'utilisation de chacun des deux minéraux, et ce avec des apports de P et de Ca apportées en accord avec les besoins des porcs. Il est à noter que le rapport optimal variera selon le critère de réponse (ex. : performances de croissance, minéralisation osseuse ou rejets de P).

1.1.4 Homéostasie

Avant d'amorcer cette section, il est important de revoir certaines notions de base au niveau du métabolisme osseux pour bien comprendre le rôle des hormones impliquées dans la régulation des concentrations de P et de Ca plasmatiques. La masse osseuse, réservoir de P et de Ca, est maintenue par un équilibre entre l'activité des ostéoblastes et des ostéoclastes (Takeda, 2003). Les ostéoblastes sont les cellules ostéogènes qui proviennent des cellules souches logées dans la plaque de croissance, le périoste ou l'endoste, alors que les ostéoclastes sont impliqués dans la résorption osseuse, et sont situés entre les espaces lacunaires des os (Figure 1.2).

Les ostéoblastes possèdent des récepteurs pour la parathormone et le calcitriol ($1,25(\text{OH})_2\text{D}_3$), leur permettant de réagir en fonction du P ou du Ca plasmatique. Les ostéoclastes sont pour leur part dépourvus de récepteurs pour la PTH, ce qui fait que ces derniers sont contrôlés à partir des autres cellules qui en possèdent (Veum, 2010).

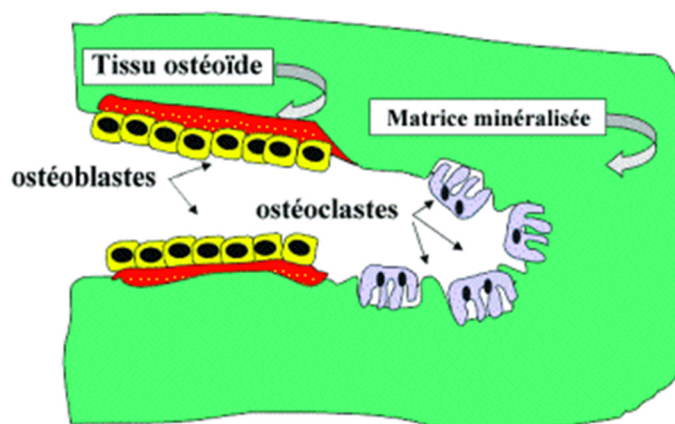


Figure 1.2. Schéma représentant les activités cellulaires de résorption (ostéoclastes) et de formation (ostéoblastes) dans le tissu osseux.

Tiré de Audran et al. (2003)

1.1.4.1 La régulation phosphocalcique

Trois principales hormones sont impliquées dans la régulation phosphocalcique, soit la parathormone, le calcitriol et la calcitonine. Ces dernières agissent principalement au niveau de trois organes cibles, soit l'intestin, les reins et les os (Figure 1.3). Puisque le Ca est impliqué dans plusieurs composés biologiques et que ses réserves dans les tissus osseux sont abondantes, sa concentration plasmatique doit être maintenue à l'intérieur de certaines limites, soit autour de 71 à 116 mg/L chez le porc (Aiello et Allen, 2016). Compte tenu de son système de régulation efficace, ses rôles fonctionnels ne seront altérés que si les quantités dans l'aliment sont très basses ou très élevées. Les mécanismes qui interviennent dans l'homéostasie du P sont pour leur part moins bien connus, mais tout comme le Ca, sa régulation est dépendante de la mobilisation de ses réserves dans l'os, de son absorption intestinale et de sa sécrétion rénale (Crenshaw, 2001). Le P plasmatique est beaucoup plus sensible à de légères variations de P dans l'aliment comparativement à la concentration plasmatique du Ca, ce qui fait qu'une faible carence en P, par exemple, suffira à faire diminuer la phosphorémie (Cromwell, 1996). Cette dernière doit d'ailleurs être maintenue entre 53 et 96 mg/L (Aiello et Allen, 2016).

La PTH, une hormone sécrétée par la glande parathyroïde, répond à l'hypocalcémie ou à l'hyperphosphorémie de diverses façons pour augmenter la concentration de Ca ou

diminuer celle du P plasmatique selon chacun des cas (Figure 1.3). En tant qu'hypercalcémiant, son rôle principal consiste à stimuler la résorption osseuse en activant les ostéoclastes et en empêchant la formation de matrice de cellules ostéoblastes (Marieb, 2005). Parallèlement, dès que la concentration de Ca plasmatique devient trop faible, la PTH bloque la réabsorption rénale de P et augmente son excrétion urinaire. Ainsi, elle réagit à l'insuffisance calcique afin d'éviter une hyperphosphorémie consécutive à la résorption osseuse (Pointillart et al., 1998). La PTH augmente aussi indirectement l'absorption intestinale de Ca et la mobilisation du Ca et du P osseux en agissant sur le métabolisme de la vitamine D₃ au niveau rénal, en la transformant sous sa forme active, le calcitriol (Crenshaw, 2001). Cette conversion a lieu lorsque la carence en Ca est soutenue (Veum, 2010). La PTH, couplée avec le calcitriol, peut être très efficace pour contrer une carence de Ca dans l'aliment.

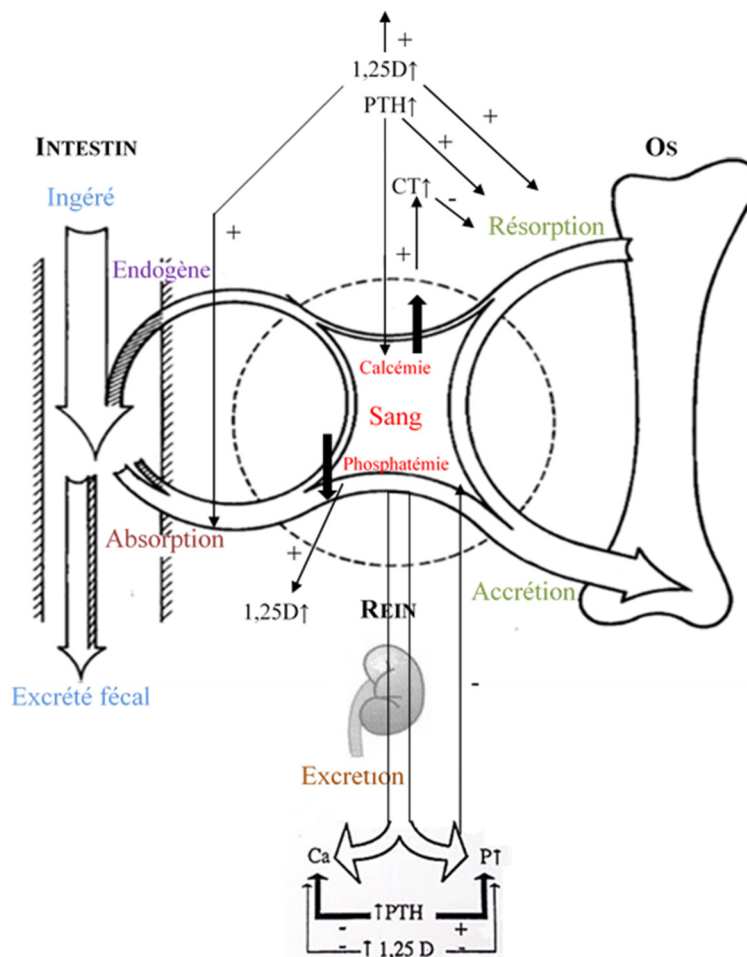


Figure 1.3. Mécanismes impliqués dans la régulation du P et du Ca dans l'organisme.

Adapté de Besançon et Guégen (1969) et Pointillart (1998)

Eklou-Kalonji et al. (1999) ont d'ailleurs montré l'effet positif de la PTH, qui aurait permis de maintenir le taux de Ca plasmatique de jeunes porcs sevrés à des niveaux normaux sur une période de deux semaines, et ce malgré des apports couvrant seulement 58 % des besoins de Ca. Les mêmes auteurs auraient également déduit que plus la carence en Ca est élevée et s'échelonne sur une longue période de temps, plus la sécrétion de PTH par la glande parathyroïde est élevée (Figure 1.4). Il existe donc une relation proportionnelle entre les concentrations plasmatiques de Ca et les quantités d'hormones sécrétées pour la régulation (DeLuca, 2008).

La régulation par la PTH a toutefois ses limites, car une carence prolongée stimulera continuellement la résorption osseuse, ce qui aura des répercussions négatives sur la minéralisation osseuse (Eklou-Kalonji et al., 1999).

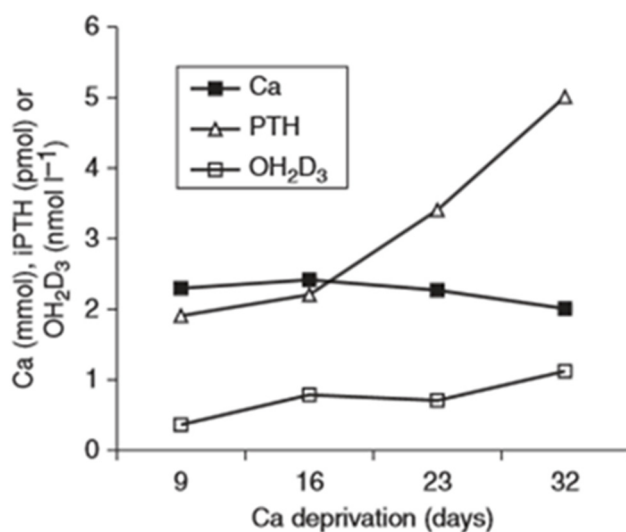


Figure 1.4. Changements plasmatiques suite à la réduction séquentielle du Ca dans l'alimentation de porcs sevrés durant une période de 32 jours.

Tiré de Eklou-Kalonji et al., 1999, adapté de Suttle, 2010

De plus, si cette carence se poursuit, la résorption osseuse finira aussi par atteindre sa limite car l'os doit contenir une quantité minimale de Ca par rapport au P pour lui permettre de jouer son rôle de soutien (rapport Ca :P massique de 1,5 à 2,0 selon la maturité du porc;

Georgievskii et al., 1982). Il est important de noter que l'impact et l'endroit de la mobilisation osseuse varieront en fonction de l'âge de l'animal. En effet, lors de sa croissance, l'os trabéculaire ou os spongieux, situé à l'extrémité de l'os, est un réservoir de P et de Ca plus facilement disponible pour la résorption osseuse, le transfert plasmatique, et le maintien de l'homéostasie que l'os cortical ou os compact, situé au centre de l'os (Marieb, 2005). Un animal adulte dont la croissance squelettique est complétée tolérera donc beaucoup mieux la déminéralisation osseuse comme processus de régulation (Suttle, 2010).

Ensuite, le calcitriol, tout comme la PTH, agit à titre d'hormone hypercalcémiant, mais est à la fois hyperphosphatémiant (Pointillart, 1998). Sa production est d'ailleurs stimulée par la PTH et son rôle principal est de faciliter l'absorption du Ca en augmentant entre autres son transport actif grâce à l'augmentation de sa synthèse. Ses autres fonctions liées au Ca vont de pair avec la PTH. En hypophosphatémie, elle accroît l'absorption intestinale de P puis mobilise le P de l'os (Pointillart, 1998).

La CT, une hormone sécrétée par les cellules C de la glande thyroïde, réagit quant à elle à une concentration élevée de Ca plasmatique (Figure 1.3). Contrairement à la PTH et au calcitriol, la CT veut empêcher l'hypercalcémie (Pointillart, 1998). Elle augmente donc le stockage de Ca dans les cellules du cytosol, elle améliore sa sécrétion rénale et empêche la résorption osseuse (Crenshaw, 2001).

1.1.5 Apports alimentaires en phosphore et en calcium chez le porc

1.1.5.1 Besoins

Selon Jongbloed et al. (1999), les besoins des animaux peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que l'animal lui-même (état physiologique, niveau et type de production), la ration et la stratégie alimentaires (quantité d'aliments administrés, composition chimique et interactions entre les aliments), l'environnement (température, état sanitaire, gestion d'élevage) et le critère utilisé (marge d'erreur ou seuil minimal). Lors de la formulation des aliments, les besoins sont généralement établis à partir de ceux d'un porc

moyen représentatif du groupe (Pomar et al., 2003). Par conséquent, comme les besoins ne sont pas les mêmes d'un porc à l'autre, certains porcs du groupe sont suralimentés alors que d'autres sont sous-alimentés. L'estimation des besoins en P et en Ca n'est donc pas simple en soi puisqu'elle doit tenir compte de tous ces facteurs pour être la plus précise possible.

La notion de besoin de P se définit donc par un ensemble de critères, principalement par l'optimisation de la croissance et de la minéralisation osseuse, ainsi que la minimisation de l'excrétion de P. À ce jour, les recommandations du NRC (2012) et celles de l'INRA (Jondreville et Dourmad, 2005) ne présentent pas les mêmes valeurs de P et de Ca compte tenu des différences qui existent entre les méthodes utilisées pour estimer le besoin. Les deux méthodes utilisent l'approche factorielle de détermination des besoins, c'est-à-dire qu'elle additionne les besoins d'entretien, de croissance et de production (Guégen et Perez, 1981). Plus précisément, le besoin d'entretien correspond aux pertes endogènes via les fèces ou l'urine. Celui pour la croissance correspond au stockage quotidien de P et de Ca nécessaire pour une minéralisation osseuse et une croissance des tissus mous optimales en fonction du gain de poids dans le cas de l'INRA et du dépôt de protéines pour le NRC. Le besoin pour la production ne s'applique que chez la truie.

La méthode factorielle demande ainsi à ce que le dépôt optimal d'un nutriment soit déterminé, cette valeur étant obtenue par des compositions corporelles ou par bilan métabolique. Du côté des tables nord-américaines, le besoin en P digestible standardisé basé sur le dépôt protéique (NRC, 2012) est estimé selon l'équation suivante :

$$\begin{aligned} P \text{ digestible standardisé } \left(\frac{g}{d} \right) \\ = 0,85 \times [(rétention \text{ maximale de } P \text{ corporel})/0,77 + 0,19 \\ \times \text{ matière sèche ingérée} + 0,007 \times PV] \end{aligned}$$

Où matière sèche ingérée et PV sont en kg, et rétention maximale de P corporel en g.

Cette estimation considère que les performances de croissance sont maximisées à 85 % de la minéralisation osseuse maximale. Du côté des tables européennes, puisque l'estimation

du besoin se base sur la minéralisation osseuse maximale, les valeurs de P et de Ca estimées sont plus élevées que celles du NRC (2012) (Jondreville et Dourmad, 2005) :

$$P \text{ corporel (g)} = -0,002857 \times PV^2 + 5,4199 \times PV$$

$$P \text{ endogène (mg/d)} = 10 \times PV$$

Où PV est en kg.

1.1.5.2 Teneurs en phosphore et en calcium des matières premières

Puisqu'il existe une grande variabilité entre les teneurs en P des matières premières, il est important d'en faire la caractérisation pour se rapprocher au maximum des besoins de l'animal lors de la formulation. Pour ce faire, il faut connaître leur teneur en P total, qui ne tient toutefois ni compte de la nature chimique du P ni de sa disponibilité (Jondreville et Dourmad, 2005). Des concepts existent donc pour décrire la valeur de P des matières premières de manière plus précise, tels que la digestibilité apparente, utilisée dans les tables néerlandaises (CVB) et françaises (INRA), et la digestibilité standardisée, utilisée dans les tables nord-américaines. La digestibilité représente la fraction absorbée alors que celle qui est non absorbée est excrétée dans les fèces. Quel que soit le système utilisé, connaître la quantité de nutriments disponibles pour le métabolisme animal est essentiel pour bien ajuster les apports aux besoins des porcs et ainsi éviter les carences et les excès.

Avant de préciser les deux concepts de digestibilité, il faut savoir qu'auparavant, les tables de références (ex. : NRC, 1998) utilisaient le concept de disponibilité métabolique, soit un indicateur global d'utilisation de la source de P étudiée (Jondreville et Dourmad, 2005). La disponibilité se décrit comme étant la forme chimique utilisable par l'organisme suite à l'absorption, alors que la fraction absorbée qui est non disponible est excrétée dans l'urine. La disponibilité du P est calculée selon une approche empirique où la minéralisation osseuse est souvent le critère mesuré. Elle est déterminée par des essais dose-réponse où la source étudiée est comparée à une source de référence (Lewis, 1992).

Le concept de digestibilité, développé entre autres pour les acides aminés (Stein et al., 2007), est aujourd'hui proposé pour le P par le NRC (2012). La digestibilité fécale apparente (apparent total tract digestibility, ATTD) est une méthode communément utilisée pour faire une formulation pratique des aliments, c'est-à-dire, sans ajuster les valeurs avec les pertes endogènes de P et de Ca (Kiarie et Nyachoti, 2010). Elle se mesure à la fin du tube digestif (Jondreville et Dourmad, 2005) et se décrit comme suit :

$$ATTD(\%) = \frac{Ingéré - Fécal}{Ingéré} \times 100$$

Où [Ingéré-Fécal] représente la fraction disparue du tube digestif, considérée comme absorbée.

Pour le calcul du besoin, étant donné que les valeurs attribuées aux matières premières tiennent déjà compte de l'excrétion fécale, seules les pertes urinaires correspondent au besoin d'entretien (Jongbloed et al., 1999). L'utilisation du P digestible apparent lors de la formulation des aliments comporte toutefois certaines lacunes, telles que la sous-estimation des valeurs réelles d'utilisation du P digestible étant donné qu'on ne prend pas en compte les pertes endogènes fécales (NRC, 2012). De plus, les valeurs apparentes mesurées dans les ingrédients ne seraient pas toujours additives lorsqu'utilisées dans la formulation des aliments (Fan et al., 2001).

Enfin, il est possible de mesurer la digestibilité vraie ou standardisée (standardized total tract digestibility, STTD), qui repose sur une quantification précise des pertes endogènes fécales. On distingue ces dernières par la partie dite spécifique, c'est-à-dire conditionnée par les caractéristiques de l'aliment (ex. niveau et type d'aliments, facteurs antinutritionnels, etc.), et celle non spécifique ou basale lorsqu'elle ne dépend pas de celles-ci (Stein et al., 2007). Fan et al. (2001) considèrent les pertes endogènes comme étant une composante substantielle du besoin de P et une voie importante de son excrétion, ce qui fait d'elles un élément essentiel dans l'homéostasie du P du corps entier. Chez un porc entre 25 et 50 kg par exemple, ces pertes représentent environ 6 % des pertes fécales totales de P

(NRC, 2012). Les prendre en considération peut donc nous permettre de nous rapprocher davantage de la digestibilité réelle du P et peut rendre son interprétation plus juste. La formule qui décrit la STTD est la suivante :

$$STTD (\%) = \frac{Ingéré - Fécal - Pertes\ endogènes}{Ingéré} \times 100$$

Quant au Ca, sa digestibilité est peu connue en raison du manque de données, ce qui fait que la valeur totale est toujours celle utilisée en formulation pour le besoin et dans les matières premières. L'utilisation de cette valeur totale et le faible coût du Ca n'aident pas à en limiter l'utilisation dans les rations. Des études sont en cours afin de développer davantage les connaissances et la précision par rapport à la caractérisation du Ca des matières premières (ex. Stein et al., 2011; Gonzalez-Vega et al., 2015; Gonzalez-Vega, 2016).

1.2 L'ostéochondrose

La relation d'interdépendance qui existe entre les apports phosphocalciques et la minéralisation osseuse porte souvent à croire, à tort ou à raison, que les deux puissent conjointement être la cause des problèmes de boiterie. Aucune relation n'a toutefois clairement été établie entre la minéralisation osseuse et les problèmes de boiterie, et encore moins avec le P et le Ca.

Les problèmes de boiterie fréquents qui affectent les élevages porcins et les hauts taux de réforme chez les truies poussent l'industrie à rechercher quelles en sont les principales causes pour mieux gérer le problème à la source. Parmi celles-ci, l'ostéochondrose (OC) a été reconnue comme étant la cause la plus fréquente chez les porcs de plusieurs élevages commerciaux (Crenshaw, 2006; van Grevenhof et al., 2011). Elle peut causer d'importantes pertes monétaires, en plus d'affecter grandement le bien-être du troupeau (van Grevenhof et al., 2011). Elle est aussi la deuxième cause de réforme chez les truies, après les problèmes de fertilité (van Grevenhof et al., 2012). Ses causes précises ne sont toutefois pas bien connues, mais plusieurs facteurs d'ordre génétique, environnemental et nutritionnel ont été mis de l'avant dans la littérature. Afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à cette pathologie, une revue de ses causes potentielles sera effectuée dans les prochaines sections.

1.2.1 Définition

L'OC est un désordre articulaire très commun tant chez les humains que chez plusieurs espèces animales, incluant principalement les porcs, les chevaux et les chiens (Ytrehus et al., 2007). Elle se définit plus précisément comme une atteinte dégénérative non infectieuse du cartilage épiphysaire - articulaire et de la plaque de croissance qui provoque des changements secondaires dans l'os, plus communément des lésions au niveau de l'épiphyse qui se produisent suite à la nécrose du cartilage empêchant une minéralisation et une ossification complète (Ytrehus et al., 2004b). La littérature supporte de plus en plus le fait que son initiation se ferait en présence d'une quantité insuffisante de sang dans le cartilage en croissance, ce qui provoquerait de la douleur et qui pourrait éventuellement amener

l'animal à boiter (Ytrehus et al., 2007). Son évolution se décrit selon trois formes différentes, soit la forme *latens*, qui se manifeste par une lésion au niveau du cartilage épiphysaire, la forme *manifesta*, qui se décrit par une lésion ainsi qu'un retardement dans l'ossification endochondrale (Ytrehus et al., 2007) ou la forme *dissecans* (OCD), caractérisée par des segments délogés de l'épiphysse et/ou du cartilage articulaire causant l'exposition de l'os endochondral minéralisé (Crenshaw, 2006). La pathologie sous toutes ses formes peut se manifester à une ou plusieurs articulations, à divers degrés de sévérité (Figure 1.5).

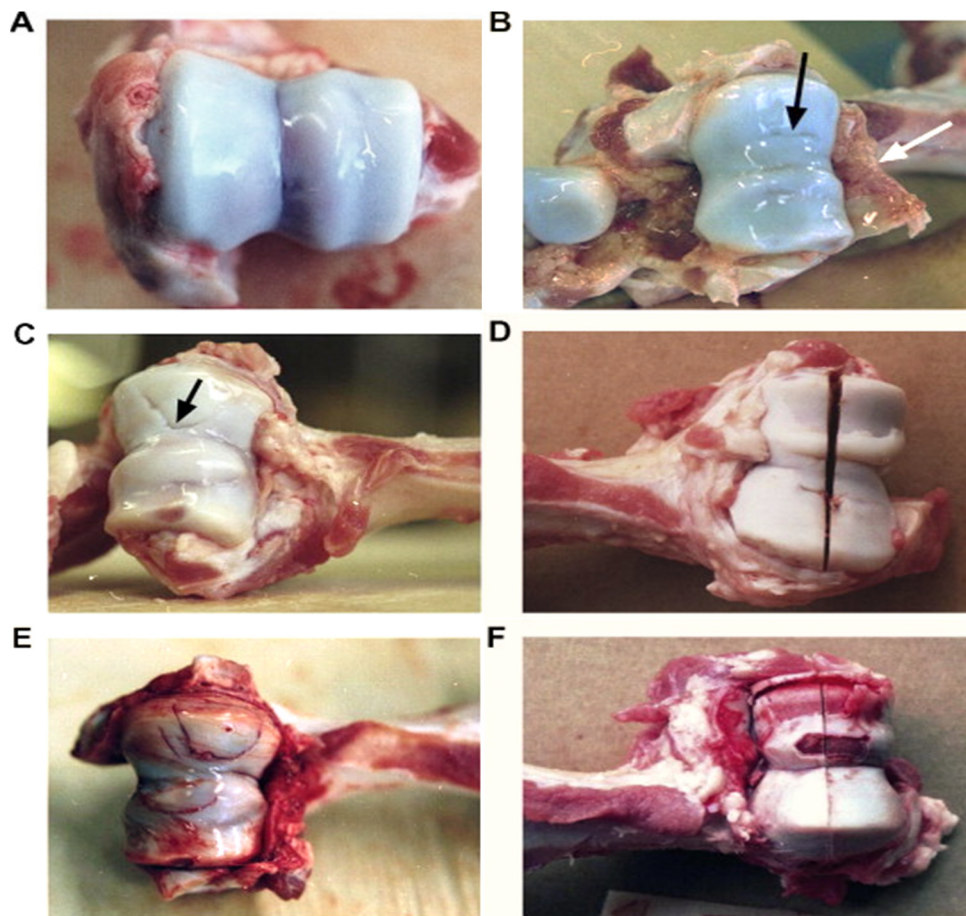


Figure 1.5. Exemples de lésions d'ostéocondrose au niveau de l'articulation du coude. (A) Surface normale du condyle huméral (B) Condyle huméral avec des irrégularités sur la partie médiane (flèche noire) et prolifération des villosités (flèche blanche) (C) Invagination du cartilage sur la partie médiane du condyle huméral (D) Irrégularités sur les parties médiane et latérale du condyle huméral (E) OCD sur la partie médiane du condyle huméral (F) OCD sur la partie latérale du condyle huméral.

Tiré et adapté de Busch et Wachmann (2011)

1.2.2 Période de susceptibilité

Selon van Grevenhof et al. (2012), la période critique pour le développement de l'OC s'échelonne de 56 à 84 jours, soit de 20 à 40 kg de poids vif, et une observation quasi similaire aurait été faite par Ytrehus et al. (2004a) avec une susceptibilité plus élevée entre 49 et 91 jours. Ytrehus et al. (2007) présumant que cette brève fenêtre de susceptibilité pourrait correspondre à la période où les vaisseaux sanguins qui approvisionnent le cartilage épiphysaire sont plus vulnérables, comparativement à l'âge adulte où le cartilage épiphysaire de l'animal est transformé en os et n'est plus desservi par ces canaux. Chez les cochettes, les problèmes de boiterie apparaissent durant la période de croissance et lors de la première parité (Wilson and Ward, 2012). Chez la truie, une incidence de boiterie plus élevée a été détectée durant le passage de la phase d'insémination à la phase de gestation (L2), comparativement au passage de la gestation à la mise bas (L3) ou au passage de la mise bas à l'insémination (L1) (Pluym et al., 2013; Figure 1.6).

Ainsi, il est utile de connaître les périodes où les animaux sont plus susceptibles de développer des problèmes de membres, mais ceci encore plus dans la mesure où des méthodes de prévention sont à la disposition des producteurs. Les nombreux facteurs soupçonnés d'être à l'origine de la boiterie, et en l'occurrence de l'OC (voir section 1.2.4), compliquent la mise en œuvre de stratégies préventives et devront être mieux étudiés.

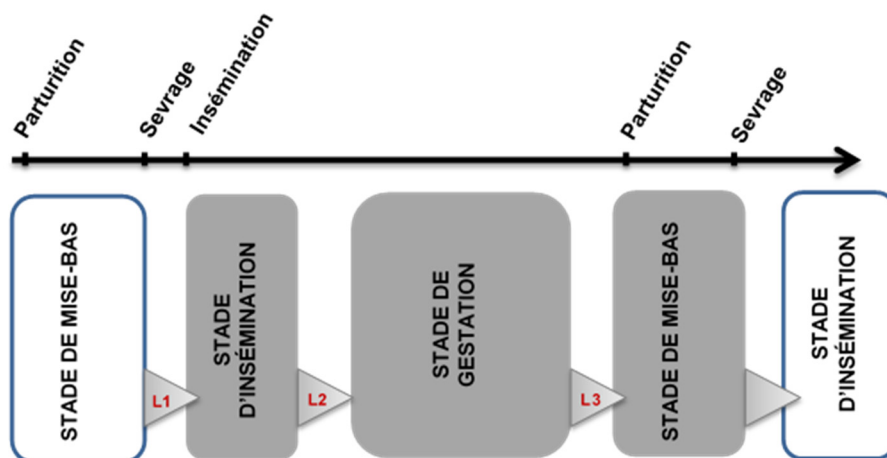


Figure 1.6. Mesures prises durant le cycle reproducteur de la truie : L'évaluation de la boiterie a été faite durant le déplacement des truies entre les différents stades de gestation (L1 à L3).

Adapté de Pluym et al. (2013)



1.2.3 Les zones à risque

Plusieurs articulations sont visées dans la littérature comme étant à risque pour développer l'OC (Figure 1.7). Jorgensen et al. (1995) ont montré que l'articulation du coude était celle où l'on retrouvait la plus grande fréquence des formes sévères d'OC, incluant l'OCD. de Koning et al. (2014) ont plutôt remarqué que l'articulation du jarret (localisation tarso-crurale) était la plus atteinte par l'OC et ses formes les plus sévères, dénotant également que l'articulation du coude était le plus souvent affectée par les formes sévères d'OC. van Grevenhof et al. (2012) ont pour leur part également remarqué une fréquence d'OC plus élevée à l'articulation du coude, mais aussi à la localisation fémoro-patellaire, alors que celle aux localisations métatarso-phalangienne et métacarpo-phalangienne était pratiquement nulle. La partie médiale de l'os serait également plus à risque que la partie latérale de développer l'OC compte tenu de la charge du poids de l'animal plus élevée au centre de l'os (Busch et Wachmann, 2011). Plusieurs localisations sont ainsi ciblées dans la littérature, mais l'existence de nombreux facteurs peut faire varier la prévalence d'OC sur chacune d'elles (de Koning et al., 2014).

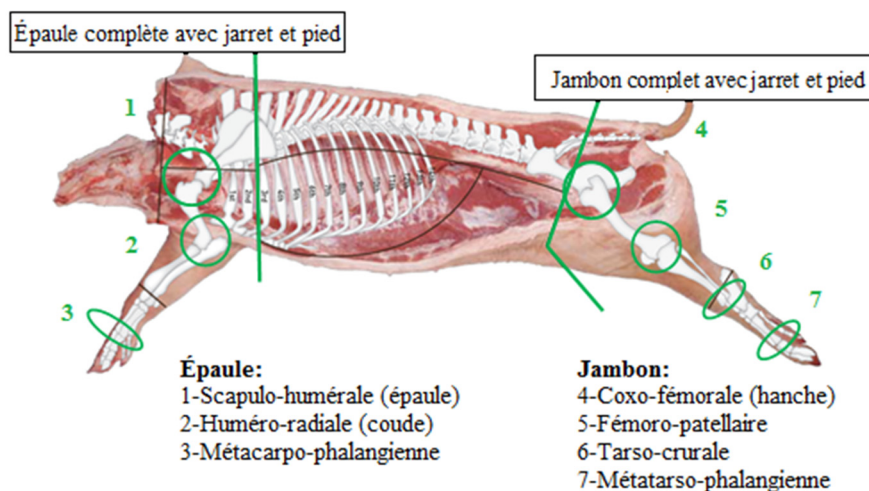


Figure 1.7. Schéma représentant les principales localisations d'ostéochondrose comprises à l'intérieur de l'épaule, du jarret et des pieds du porc.

1.2.4 Facteurs qui prédisposent à l'ostéochondrose

Jusqu'à présent dans la littérature, les évidences tendent à supporter l'hérédité et la conformation anatomique comme principaux facteurs étiologiques de l'ostéochondrose (Ytrehus et al., 2007). D'autres causes ont également été étudiées et sont connues pour contribuer au déclenchement de la pathologie ou à sa progression.

1.2.4.1. Âge, croissance rapide et stratégies alimentaires

L'amélioration génétique des lignées porcines au fil des ans a permis une croissance plus rapide des animaux, une efficacité alimentaire accrue ainsi que des changements importants dans la composition corporelle notamment au niveau de la masse musculaire qui serait plus importante et se développerait plus hâtivement (CCAP, 2014). Certains auteurs ont observé une relation positive entre la vitesse de croissance et la fréquence d'OC (Busch et Wachmann, 2011; van Grevenhof et al., 2012; de Koning et al., 2012) alors que d'autres non (Crenshaw 2003; Ytrehus et al., 2004 b). Ceux observent un lien positif expliquent que la pression croissante du poids de l'animal sur ses articulations au cours de sa croissance est ce qui contribuerait au développement de l'OC, et ce particulièrement chez les porcs en bas âge. Busch et Wachmann (2011) ont de plus montré que chaque 100 g additionnel de GMQ augmenterait d'environ 20 % les risques de développer des irrégularités au niveau du cartilage articulaire ou de l'OCD.

Afin de valider l'hypothèse que la vitesse de croissance puisse provoquer l'OC, de Koning et al. (2013) ont étudié l'effet de l'âge jumelé à une restriction alimentaire sur le développement de l'OC chez les cochettes. Au sevrage, soit à quatre semaines, quatre groupes alimentaires ont été créés, soit un groupe alimenté à volonté jusqu'à l'abattage (AA), un groupe restreint (80 % de la prise alimentaire à volonté) du sevrage à l'abattage (RR), un troisième nourri à volonté jusqu'à l'âge de 10 semaines puis restreint jusqu'à l'abattage (AR), ainsi qu'un quatrième restreint jusqu'à l'âge de 10 semaines puis alimenté à volonté jusqu'à l'abattage (RA). Après la mort des animaux, les articulations du coude, du jarret et du genou ont été prélevées et évaluées macroscopiquement. Les porcs du groupe RA ont été plus sujets à l'OC que ceux des autres groupes au niveau global (somme

des scores d'OC pour toutes les articulations; RA>AA>AR>RR). Cette étude a donc permis de conclure qu'il y avait effectivement un effet dépendant de l'âge et de la restriction alimentaire sur la prévalence d'OC. Elle montre de plus qu'une restriction modérée à partir de 10 semaines jusqu'à l'abattage ou de la période de sevrage jusqu'à la phase finition pourrait s'avérer intéressante pour réduire cette prévalence dans les élevages commerciaux. van Grevenhof et al. (2011) ont également observé que les porcs nourris à volonté de 10 semaines jusqu'à l'abattage versus ceux ayant subi une restriction alimentaire (80 % du régime à volonté) ont été davantage atteints d'OC, ce qui s'explique par le gain de poids supérieur des animaux.

Crenshaw (2003) et Ytrehus et al. (2004b) n'ont quant à eux montré aucune relation entre la fréquence d'OC et un poids d'abattage élevé. Dans les deux cas, le poids d'abattage a été atteint tardivement en raison du faible GMQ des animaux. L'absence d'une forte pression sur les articulations due à un taux de croissance plus lent est possiblement ce qui explique qu'un poids élevé d'abattage n'ait pas eu d'incidence sur l'OC. Ainsi, une croissance rapide serait plus associée à des problèmes d'OC que seul un poids élevé d'abattage.

1.2.4.2. Déséquilibres phosphocalciques

Tel que discuté précédemment, des quantités inadéquates de P et de Ca peuvent affecter la minéralisation osseuse et les performances de croissance. Bien que par définition l'OC ne soit pas liée à la minéralisation de la matrice osseuse directement, les apports phosphocalciques comportent de larges marges de sécurité chez les cochettes. Plusieurs auteurs sont d'avis que les problèmes d'OC ne seraient pas liés à une mauvaise minéralisation osseuse et donc à des apports trop faibles ou trop élevés de P, de Ca ou de vitamine D (Nakano et al., 1987; Kornegay et al., 1989; Crenshaw, 2003; Ytrehus et al., 2007). Au contraire, une étude réalisée avec des chiens de race Grand Danois de 3 à 17 semaines et recevant un aliment déséquilibré en P et en Ca, soit un niveau élevé de Ca conjointement à un niveau dit normal de P, n'a pas permis d'observer de lésions d'OC directement durant le traitement. Celles-ci sont toutefois devenues apparentes lorsque des quantités normales de Ca leur ont été administrées de 17 à 27 semaines. Le déséquilibre a

également provoqué de sévères perturbations au niveau du développement squelettique, de la croissance et de la minéralisation osseuse. Un autre groupe de chiens a reçu des quantités excessives des deux minéraux de 3 à 17 semaines et ceux-ci ont pour leur part subi un retard immédiat au niveau de leur ossification endochondrale, signe d'OC (Schoenmakers et al., 2000). Les auteurs font ainsi ressortir que l'administration d'excès de Ca en jeune âge, peu importe le niveau de P (normal ou excessif dans ce cas), peut faire apparaître des signes d'OC et avoir de sévères conséquences sur le développement squelettique de l'animal. Cependant, peu d'études ont jusqu'à maintenant prouvé un tel lien entre les apports phosphocalciques et l'incidence d'OC chez les autres espèces animales, montrant la nécessité de poursuivre les recherches à ce niveau pour résoudre le doute qui persiste.

1.2.4.3 Génétique et facteurs environnementaux

Bien que les causes d'OC ne soient pas clairement établies, plusieurs preuves montrent qu'elles peuvent non seulement être d'ordre génétique mais également d'ordre environnemental (de Koning et al., 2014). Ytrehus et al. (2004b) montrent que les cochettes et les castrats nés de différents mâles sélectionnés pour leurs traits d'OC peuvent avoir une incidence d'OC différente et que les zones touchées et leur degré de sévérité peuvent varier selon la portée. L'héritabilité des faiblesses aux membres et de l'OC, qualifiée de faible à modérée dans les études génétiques, rendrait toutefois difficile la résolution du problème uniquement avec la sélection (Nakano et al., 1987). De plus, bien qu'il ait été possible d'établir un lien entre la génétique et l'OC, il est complexe, dans un contexte de sélection génétique, de faire le choix des bons caractères (ex. conformation des articulations) pour évaluer correctement l'héritabilité de la maladie.

Au niveau environnemental, il est établi que certains paramètres d'élevage, tels que le logement (porcs logés en cage ou en groupe), la densité animale et le type de recouvrement du plancher, peuvent avoir une influence sur la santé des membres en général. van Grevenhof et al. (2011) ont effectivement montré qu'un animal ayant la possibilité d'être actif grâce à son environnement réduisait ses risques de développer l'OC. Ainsi dans leur étude, les porcs à l'engraissement qui étaient en logement conventionnel, soit un plancher

en béton partiellement latté, ont été davantage atteints d'OC puisqu'ils passaient plus de temps au repos comparativement à ceux sur litière profonde. Les auteurs présument que l'activité physique aurait possiblement un impact positif sur le métabolisme et le développement osseux, réduisant ainsi la prévalence d'OC. de Koning et al. (2014) ont pour leur part évalué l'effet d'une possible dépendance entre l'âge et le type de plancher sur la prévalence d'OC. La combinaison des deux critères n'a pas été significative sur la présence d'OC. Il a toutefois été remarqué que la fréquence d'OC sévère était plus élevée lorsque les porcs étaient élevés sur une litière de sciure de bois comparativement à un plancher conventionnel. Les auteurs croyaient pourtant que le plancher conventionnel, plus glissant, allait moins bien absorber l'impact de la charge du poids de l'animal. Les litières profondes, qui augmentent l'activité physique de l'animal, auraient au contraire prédisposé l'animal à développer l'OC. de Koning et al. (2014) ont donc expliqué ceci par l'augmentation des traumatismes liés à l'activité sur les articulations et la charge accrue sur chacune d'elles due aux mouvements.

Considérant les contradictions dans la littérature, il n'est pas possible de tirer une conclusion claire à savoir quel environnement favorise le plus la santé des membres. Il est néanmoins jugé plus prudent d'offrir aux animaux un espace suffisant pour qu'ils puissent se dégourdir ainsi qu'un environnement exempt de surfaces glissantes (Torrison, 2015). De plus, sachant que plusieurs signes de troubles locomoteurs peuvent être reliés à l'OC (Engblom et al., 2008; de Koning et al., 2012), effectuer une observation visuelle fréquente du comportement des animaux dans leur environnement est actuellement la méthode la plus accessible aux producteurs (Grégoire et al., 2013) et constitue une première étape pour limiter les risques de développement de problèmes locomoteurs chez les animaux.

1.2.5 Méthodes de détection

1.2.5.1 Détection sur l'animal vivant

L'OC étant une cause majeure de la boiterie, certains signes cliniques, tels que les difficultés de l'animal à se déplacer ou à se lever, à mettre du poids sur ses membres ou à les positionner correctement peuvent être observés sur l'animal vivant qui en est affecté.

Toutefois, ceux-ci ne se manifestent pas nécessairement dès qu'une des articulations en est atteinte (Jorgensen et al., 1995; Stavrakakis et al., 2014). Au niveau expérimental, certains protocoles existent pour évaluer la démarche des porcs, mais comme il s'agit d'évaluations subjectives, les résultats qui associent les faiblesses aux membres et les lésions d'OC sont très variables. Jorgensen et al. (1995) n'ont pas pu établir d'association entre l'OC et les faiblesses aux membres, alors que de Koning et al. (2012) ont remarqué une association significative entre les faiblesses aux membres, incluant les problèmes de conformation et de démarche, l'OC et son degré de sévérité. Stavrakakis et al. (2014) ont de plus observé que la démarche des porcs en finition était affectée par les lésions d'OC seulement lorsque ces dernières étaient modérées ou sévères. Plusieurs se posent la question à savoir si ce ne sont pas plutôt les faiblesses aux membres qui contribuent au développement de l'OC et non l'inverse. Dans les deux cas, une telle association permettrait d'identifier les porcs ayant des problèmes de conformation et de locomotion et de les exclure rapidement du processus de sélection à des fins reproductives (de Koning et al., 2012). Des recherches supplémentaires seront toutefois nécessaires afin de trouver une échelle d'évaluation globale qui diminue la variabilité entre les résultats avant de proposer une méthode de détection fiable aux producteurs.

Puisque d'autres facteurs peuvent être la cause de la boiterie, des études ont évalué l'utilisation de marqueurs sanguins pour être en mesure de détecter avec plus de précision les signes précurseurs d'OC par des prélèvements sanguins sur l'animal vivant (Frantz, 2006; Christensen et al., 2009). Bien que cette méthode soit dispendieuse et encore au stade expérimental chez le porc, elle pourrait être prometteuse en sélection génétique car elle pourrait permettre de sélectionner les animaux contre l'OC.

1.2.5.2. Détection après l'abattage

Étant donné qu'aucune méthode n'a été suffisamment développée pour détecter l'OC avec certitude chez l'animal vivant, les méthodes invasives sont celles qui sont communément utilisées en recherche pour établir un diagnostic postabattage. Ainsi, il est possible de détecter l'OC sur la carcasse de l'animal par observation macroscopique, lorsque la surface

du cartilage est irrégulière ou qu'elle est atteinte d'OCD (Busch et Wachmann, 2011). Jorgensen et al. (1995) aurait associé l'incidence d'OCD directement à la présence de lésions sous-chondrales, alors que l'amincissement du cartilage n'y serait pas directement lié. L'amincissement du cartilage articulaire, les fissures entre le cartilage et l'os sous-chondral et la nécrose des os sont des symptômes macroscopiques qui peuvent uniquement être visibles lorsque le cartilage et l'os ont été ouverts à l'aide d'une scie (Busch et Wachmann, 2011), ce qui complexifie la détection de la pathologie. Jorgensen et al. (1995) aurait toutefois détecté une corrélation significative entre le diagnostic pathologique et celui radiographique, ce qui pourrait faciliter le diagnostic tant sur l'animal vivant que sur sa carcasse, car dans ce dernier cas il ne serait pas nécessaire d'ouvrir les articulations. Busch et Wachmann (2011) ont également pu remarquer que le cartilage irrégulier et l'OCD étaient fortement associés aux lésions sous-chondrales, ce qui pourrait encore une fois sauver temps et argent au niveau du diagnostic.

Ainsi, dans un premier temps, mieux cerner les causes de la maladie serait nécessaire pour trouver le meilleur moyen de la prévenir ou de la détecter lorsque l'animal est en vie. Dans un deuxième temps, les diagnostics après abattage devront être affinés afin d'identifier plus efficacement les symptômes qui décrivent l'OC.

1.3 Liste des ouvrages cités

- Aiello S.E., Allen D.G. 2016. The Merck veterinary manual 11th edition. Merck & Co inc., Kenilworth, NJ. 3325 pages.
- Audran M., Insalaco P., Legrand E., Libouban H., Basle M.F., Chappard D. 2003. Physiologie du tissu osseux chez l'homme. Progrès en Urologie, 3, 3-8.
- Besançon P., Guégen L. 1969. Les principales voies du métabolisme calcique chez le porc en croissance. Ann. Biol. Anim. Biochim. Biophys., 9, 537-553.
- Busch M.E., Wachmann H. 2011. Osteochondrosis of the elbow joint in finishing pigs from three herds: Associations among different types of joint changes and between osteochondrosis and growth rate. Vet. J., 118, 197-203.
- Centre Canadien pour l'Amélioration des Porcs inc. (CCAP). 2014. Rapport annuel 2014, Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard. https://www.ccsi.ca/meetings/annual/Rapportannuel_2014_FR.pdf (page consultée le 23 mars 2014).
- Christensen O.F., Busch M.E., Gregersen V.R., Lund M.S, Nielsen B., Vingborg R.K.K., Bendixen C. 2009. Quantitative trait loci analysis of osteochondrosis traits in the elbow joint in pigs. Animal, 4, 417-424.
- Crenshaw T.D. 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. Pages 187-212 dans Swine nutrition second edition. A.J. Lewis & L.L. Southern (Éd). CRC Press, Florida, USA.
- Crenshaw T.D. 2003. Nutritional manipulation of bone mineralization in developing gilts. Allen D. Leman Swine Conference.
- Crenshaw T.D. 2006. Arthritis or OCD- Identification and Prevention. Advances in Pork Production, 17, 199-208.
- Cromwell G.L., Stahly T.S., Coffey R.D., Monegue H.J., Randolph J.H. 1993. Efficacy of phytase in improving the bioavailability of phosphorus in soybean meal and corn-soybean meal diets for pigs. J. Anim. Sci., 71, 1831-1840.
- Cromwell G.L. 1996. Metabolism and role of phosphorus, calcium, and vitamin D3 in swine nutrition. Pages 101-110 dans Phytase in animal nutrition and waste management. BASF corporation (éd). Mount Olive, New Jersey, États-Unis.
- de Koning D.B., van Grevenhof E.M., Laurensen B.F.A, Ducro B.J., Heuven H.C.M., de Groot P.N., Hazeleger W., Kemp B. 2012. Associations between osteochondrosis and conformation and locomotive characteristics in pigs. J. Anim. Sci., 90, 4652-4763.

- de Koning D.B., van Grevenhof E.M., Laurensen B.F.A., van Weeren P.R., Hazeleger W., Kemp B. 2013. The influence of dietary restriction before and after 10 weeks of age on osteochondrosis in growing gilts. *J. Anim. Sci.*, 91, 5167-6591.
- de Koning D.B., van Grevenhof E.M., Laurensen B.F.A., van Weeren P.R., Hazeleger W., Kemp B. 2014. The influence of floor type before and after 10 weeks of age on osteochondrosis in growing gilts. *J. Anim. Sci.*, 92, 3338-3347.
- DeLuca H.F. 2008. Evolution of our understanding of vitamin D. *Nutrition reviews*, 66, 73-87.
- Driver J.P., Pesti G.M., Bakalli R.I., Edwards J.H.M. 2005. Effects of calcium and nonphytate phosphorus concentrations on phytase efficacy in broiler chicks. *Poultry Sci.*, 84, 1406-1417.
- Eeckhout W., de Paepe M., Warnants N., Bekaert H., 1995. An estimation of the minimal P requirements for growing-finishing pigs, as influenced by the Ca level of the diet. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 52, 29-40.
- Eklou-Kalonji E., Zerath E., Colin C., Lacroix C., Holy X., Denis I., Pointillart A. 1999. Calcium-regulating hormones, bone mineral content, breaking load and trabecular remodeling are altered in growing pigs fed calcium-deficient diets. *J. Nutr.*, 129, 188-193.
- Ekpe E.D., Zijlstra R.T., Patience J.F., 2002. Digestible phosphorus requirement of grower pigs. *Can J. Anim. Sci.*, 82, 541-549.
- Engblom L., Eliasson-Selling L., Lundeheim N., Belák K., Andersson K., Dalin A.M. 2008. Post mortem findings in sows and gilts euthanised or found dead in a large Swedish herd. *Acta Vet. Scand.*, 50, 1-10.
- Fan M.Z., Archbold T., Sauer W.C., Lackeyram D., Rideout T., Gao Y., De Lange C.F.M., Hacker R.R. 2001. Novel methodology allows measurement of the true phosphorus digestibility and the gastrointestinal endogenous phosphorus outputs in studies with pigs. *J. Nutr.*, 131, 2388-2396.
- Frantz N.Z. 2006. The effect of dietary nutrients on osteochondrosis in swine and evaluation of serum biomarkers to predict its occurrence. Thèse de doctorat. Université du Kansas, Manhattan, Kansas.
- Georgievskii V.I., Annenkov B.L., Samokhin V.I. 1982. Mineral nutrition of animals. Butterworths, London. 488 pages.
- González-Vega J.C., Walk C.L., Liu Y., Stein H.H. 2014. The site of net absorption of Ca from the intestinal tract of growing pigs and effect of phytic acid, Ca level and Ca source on Ca digestibility. *Arch. Anim. Nutr.* 68:126-142.

- González-Vega J.C., Walk C.L., Stein H.H. 2015. 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. 2016. Digestibility of calcium and digestible calcium requirements in pigs. Thèse de doctorat. Université d'Illinois, Urbana, Illinois.
- Guéguen L., Perez J.M. 1981. A re-evaluation of recommended dietary allowances of calcium and phosphorus for pigs. *Proc. Nutr. Soc.*, 40, 273-278.
- Grégoire J., Bergeron R., D'Allaire S., Meunier-Salaün M.C., Devillers N. 2013. Assessment of lameness in sows using gait, footprints, postural behaviour and foot lesion analysis. *Animal*, 7, 1163-1173.
- Hall D.D., Cromwell G.L., Stahly T.S. 1991. Effects of dietary calcium, phosphorus, calcium :phosphorus ratio and vitamin K on performance, bone strength and blood clotting status of pigs. *J. Anim. Sci.*, 69, 646-655.
- Heaney R., Nordin B.E. 2002. Calcium effects on phosphorus absorption: implications for the prevention and co-therapy of osteoporosis. *J. Am. Coll. Nutr.*, 21, 239-244.
- Jongbloed A.W., Everts H., Kemme P.A., Mroz Z. 1999. Quantification of absorbability and requirements of macroelements. Pages 275-298 dans *A quantitative biology of the pig*. I. Kyriazakis (Éd.). CAB international, Wallingford, UK.
- Jondreville C., Dourmad JY. 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Productions Animales*, 18, 183-192.
- Jorgensen B., Arnbjerg J., Aaslyng M. 1995. Pathological and radiological investigations on osteochondrosis in pigs, associated with leg weakness. *J. Vet. Med.*, 42, 489-504.
- Kiarie E., Nyachoti C.M. 2010. Bioavailability of calcium and phosphorus in feedstuffs for farm animals. Pages 76–93 dans *Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals*. Vitti D.M.S.S., Kebreab E. Cab International (éd.). Department of Animal Science, Californie, Davis, États-Unis.
- Kornegay E.T. 1985. Calcium and phosphorus in animal nutrition. National feed ingredient association, West Des Moines, IA.
- Kornegay E.T., Combs N.R., Veit H.P., Lindemann M.D. 1989. Articular cartilage condition score of distal humerus and femur of swine as influenced by dietary Ca-P levels, sex and age. *Can J. Anim.*, 70, 255-258.
- Les Éleveurs de porcs du Québec. 2013. Rapport de l'Étude coût de production 2012. [En ligne]. http://www.leseleveursdeporcsduquebec.com/upa_porcs_files/20131118_etude_cout_de_production_2012.pdf

- Lewis, A. J. 1992. Determination of the amino acid requirements of animals. Pages 67-86 dans *Modern methods in protein nutrition and metabolism*. S. Nissen (éd.). Academic Press, San Diego, CA, États-Unis.
- Liu J., Bollinger D.W., Ledoux D.R., Veum T.L. 2000. Effects of dietary calcium:phosphorus ratios on apparent absorption of calcium and phosphorus in the small intestine, cecum, and colon of pigs. *J. Anim. Sci.*, 78, 106-109.
- Marieb E.N. 2005. *Anatomie et physiologie humaine 3e.*, ERPI (Éd), Québec, Canada. 1288 pages.
- Marquis R. 2004. Le phosphore, des excès dispendieux! [En ligne]. https://www.agrireseau.net/porc/documents/Expo-Congr%C3%A8s%20Marquis_Roy.pdf (page consultée le 3 avril 2016).
- McDowell, L.R. 1992. *Minerals in Animal and Human Nutrition*. Academic Press, London, UK. 524 pages.
- Nakano T., Brennan J.J., Aherne F.X. 1987. Leg weakness and osteochondrosis in swine: A review. *Can. J. Anim. Sci.*, 67, 883-901.
- NRC. 1998. *Nutrient requirements of swine 10th edition*. National Academy Press, Washington, DC. 189 pages.
- NRC. 2012. *Nutrient requirements of swine 11th edition*. National Academy Press, Washington, DC. 400 pages.
- Pluym L.M., Van Nuffel A., Van Weyenberg S., Maes D. 2013. Prevalence of lameness and claw lesions during different stages in the reproductive cycle of sows and the impact on reproduction results. *Animal*, 7, 1174-1181.
- Pointillart A. 1994. Phytates, phytases : leur importance dans l'alimentation des monogastriques. *INRA Productions Animales*, 7, 29-39.
- Pointillart A. 1998. Le métabolisme phosphocalcique chez le porc : applications nutritionnelles, écologiques et pathologiques. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 84, 77-89.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.H., Pomar J., Lovatto P.A. 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pigs operations. *Braz. J. Anim. Sci.*, 38, 226-237.
- Pomar C., Kyriazakis I., Emmans G. C., Knap P. W. 2003. Modeling stochasticity: dealing with populations rather than individual pigs. *J. Anim. Sci.*, 81, 178-186.

- Quinn A., Calderon-Diaz J.A. 2013. *The Problem of Lameness on Irish Pig Farms*. <http://www.thepigsite.com/articles/4466/the-problem-of-lameness-on-irish-pig-farms> (page consultée le 7 décembre 2015).
- Reinhart G.A., Mahan D.C. 1986. Effect of various calcium:phosphorus ratios at low and high dietary phosphorus for starter, grower and finishing swine. *J. Anim. Sci.*, 63, 457-466.
- Selle P.H., Ravindran V. 2008. Phytate-degrading enzymes in pig nutrition. *Livest. Sci.*, 113, 99-122.
- Schoenmakers I., Hazewinkel H.A.W., Voorhout G., Carlson, C.S., Ricardson D. 2000. Effect of diets with different calcium and phosphorus contents on the skeletal development and blood chemistry of growing great danes. *Vet. Rec.*, 147, 652-660.
- Stavrakakis S., Guy J.H., Warlow O.M.E., Johnson G.R., Edwards S.A. 2014. Walking Kinematics of growing pigs associated with differences in musculoskeletal conformation, subjective gait score and osteochondrosis. *Livest. Sci.*, 165, 104-113.
- Stein H. H., B. Sève, M. F. Fuller, P. J. Moughan, and C. F. M. de Lange. 2007. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: Terminology and application. *J. Anim. Sci.* 85:172–180.
- Stein H. H., Adeola O., Cromwell L., Kim S.W., Mahan D.C, Miller P.S. 2011. Concentration of dietary calcium supplied by calcium carbonate does not affect the apparent total tract digestibility of calcium, but reduces digestibility of phosphorus by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 2139-2144.
- Suttle N.F. 2010. *The mineral nutrition of livestock*. 4th ed. CABI Publishing, Wallingford, UK, 587 pages.
- Takeda S., Eleftheriou F., Karsenty G. 2003. Common endocrine control of body weight, reproduction, and bone mass. *Ann. Rev. Nutr.*, 23, 403-411.
- Torrison J. 2015. Lameness in breeding gilts, sows, and boars. [En ligne]. http://www.merckvetmanual.com/mvm/musculoskeletal_system/lameness_in_pigs/lameness_in_breeding_gilts_sows_and_boars.html (page consultée le 10 septembre 2016).
- Underwood E.J., Suttle N.F. 2001. *The mineral nutrition of livestock*. CABI Publishing, Wallingford, UK, 105-149.
- van Grevenhof E.M., Ott S., Hazeleger W., van Weeren P.R., Bijma P., Kemp B. 2011. The effects of housing system and feeding level on joint-specific prevalence of osteochondrosis in fattening pigs. *Livest. Sci.*, 135, 53-61.

- van Grevenhof E.M., Heuven H.C.M., van Weeren P.R., Bijma, P. 2012. The relationship between growth and osteochondrosis in specific joints in pigs. *Livest. Sci.*, 143, 85-90.
- Veum T.L. 2010. Phosphorus and calcium nutrition and metabolism. Pages 94-111 dans *Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals*. Vitti D.M.S.S., Kebreab E. Cab International (éd.). Department of Animal Science, Californie, Davis, États-Unis.
- Vipperman Jr. P.E., Peo Jr. E.R., Cunningham P.J. 1974. Effect of dietary calcium and phosphorus level upon calcium, phosphorus and nitrogen balance in swine. *J. Anim. Sci.*, 38, 758-765.
- Weremko D., Fandrejewski H., Zebrowska T., Han K., Kim J.H., and Cho W.T. 1997. Bioavailability of phosphorus in feeds of plant origin for pigs. A review. *Aust. J. Am. Stud.*, 10, 551-566.
- Wilson M.E., Ward T.L. 2012. Impact of lameness on productive potential of the sow. A time For Change. 12th London Swine Conference. March 28-29. p 27-33.
- Ytrehus B., Carlson C.S., Lundeheim N., Mathiesen L., Reinholt F.P., Teige J., Ekman S. 2004a. Vascularisation and osteochondrosis of the epiphyseal growth cartilage of the distal femur in pigs-development with age, growth rate, weight and joint shape. *Bone*, 34, 454-465.
- Ytrehus B., Grindflek E., Treige J., Stubsjoen E., Grondalen T., Carlson C.S., Ekman S. 2004b. The effect of parentage on the prevalence, severity and location of lesions of osteochondrosis in swine. *J. Vet. Med.*, 51, 188-195.
- Ytrehus B., Carlson C.S., Ekman S. 2007. Etiology and pathogenesis of osteochondrosis. *Vet. Pathol.*, 44, 429-448.

CHAPITRE 2

Estimation des besoins de phosphore et de calcium chez le porc de 25 à 50 kg de poids vif.

Langlois, J.¹⁻², Pomar C.², Létourneau-Montminy M.P.¹

(1)Département des sciences animales, Université Laval, Québec, Québec, Canada

(2)Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, Québec, Canada

Ce deuxième chapitre est constitué de l'article court publié dans le cadre des 48^e Journées de la Recherche Porcine 2016, congrès scientifique qui s'est déroulé à Paris en février. L'article inséré dans ce mémoire comporte peu de modifications. Une section *Matériel complémentaire* (Tableaux 2.3 et 2.4) a donc été ajoutée à la fin du chapitre afin que tous les résultats qui n'ont pas pu être présentés dans l'article soient à la disposition des lecteurs. L'article contient une première partie qui présente un essai préliminaire réalisé à l'animalerie de l'Université Laval. Les résultats de cet essai préliminaire ont permis de guider notre choix pour la détermination des apports alimentaires en P et en Ca correspondant au traitement 100 % durant la phase expérimentale de l'essai principal. L'affiche de l'essai préliminaire (congrès 2015 du 13th Digestive Physiology of Pigs, Kliczków, Pologne) a été mise en annexe. L'affiche présentant les résultats de la phase 1 de l'expérience principale (congrès 2016 des 48^e Journées de la Recherche Porcine), et la version publiée du texte présenté dans ce chapitre sont également disponibles en annexe. La phase expérimentale de cette étude a été réalisée au Centre de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Sherbrooke, Québec.

Résumé

Les effets de différents apports alimentaires en phosphore (P) ont été étudiés (60, 80, 100, 120 et 140 % des besoins de P, avec un rapport calcium:P fixe) en termes de minéralisation osseuse, de rétention corporelle de P et de calcium (Ca) et de performances de croissance chez le porc en croissance. Quatre-vingts porcs ($23,8 \pm 2,7$ kg) ont reçu un des cinq traitements alimentaires pour une période de 28 jours. La consommation moyenne journalière (CMJ) a été notée et huit porcs par traitement ont été pesés et scannés par DXA au début et à la fin de l'expérience. La CMJ ($P = 0,04$) et le gain moyen quotidien (GMQ, $P < 0,01$) des porcs ont augmenté linéairement (60 vs 140 % des besoins, +8 % GMQ) et le contenu minéral osseux a augmenté significativement (Lin : $P < 0,001$; Qua : $P = 0,03$, Cub : $P = 0,07$) avec l'augmentation des quantités de Ca et de P alimentaires. La rétention corporelle du P a été minimisée avec la ration contenant 60 % de P, mais n'a pas été maximisée avec celle contenant le plus haut niveau de P (Lin: $P < 0,001$; Qua : $P = 0,005$; Cub : $P = 0,01$). Ces résultats confirment les besoins plus élevés en Ca et en P afin de maximiser la minéralisation osseuse comparativement aux performances de croissance.

Abstract

An experiment was conducted to study the effect of different dietary phosphorus (P) (60-80-100-120-140% of P requirements, with equal calcium: P ratio) in terms of bone mineralization, whole-body P and calcium (Ca) retention and growth performance in growing pigs. Eighty pigs (23.8 ± 2.7 kg) received one of the five dietary treatments for a period of 28 days. Average daily feed intake (ADFI) was recorded and eight pigs per treatment were weighed and scanned with Dual energy X-ray absorptiometry at the beginning and at the end of the experiment. The ADFI ($P = 0.04$) and average daily gain (ADG, $P < 0.01$) of pigs increased linearly (60 vs 140%, +8% ADG) and bone mineral content increased significantly (Lin : $P < 0.001$, Qua : $P = 0.03$, Cub : $P = 0.07$) with the increase of dietary P and Ca. Whole-body retention of P was minimized with the diet containing 60% of P, but it was not maximized with the diet containing the higher level of P (Lin: $P < 0.001$, Qua : $P = 0.005$, Cub : $P = 0.01$). These results confirm higher Ca and P requirements for maximal bone mineralization compared to growth performance.

2.1 Introduction

Les besoins de P et de Ca chez le porc en croissance varient selon le critère de performance considéré. Ainsi, certaines recommandations alimentaires ont pour objectif de maximiser la minéralisation osseuse (Jondreville et Dourmad, 2005) et d'autres les performances de croissance (NRC, 2012). Quoi qu'il en soit, les publications à l'origine de ces recommandations datent de plusieurs années. L'objectif de cette étude est de réévaluer l'impact de différents apports de P chez le porc en début de croissance.

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Essai préliminaire

Les teneurs en P et en Ca de l'aliment témoin ont été déterminées dans un essai préliminaire. Vingt-quatre porcelets logés individuellement (Large White x Landrace, 17,9 ± 2,0 kg) ont été attribués à un des quatre traitements alimentaires durant 28 jours où l'eau et l'aliment étaient servis à volonté. Les aliments ont été formulés suivant un dispositif factoriel 2 x 2 où le Ca (NRCCa et INRACa : 2,15 et 2,9 g Ca:P digestible respectivement) et le P digestible (NRCP et INRAP : 2,7 et 3,2 g/kg respectivement) étaient les facteurs principaux. Les niveaux utilisés correspondent respectivement aux recommandations du NRC (2012) et de Jondreville et Dourmad (2005). Après 21 jours, une collecte totale des urines et des fèces de 5 jours a été réalisée. Ensuite, les porcs ont été pesés et soumis à des mesures d'absorption biphotonique à rayons X (DXA; Prodigy, GE Healthcare, Madison, WI) pour estimer le contenu minéral osseux (CMO), et le P et le Ca corporels (Létourneau-Montminy et al., 2015). Des analyses de variance ont été effectuées sur les variables étudiées avec les effets fixes de P, Ca et leur interaction (proc MIXED, SAS 9.4, SAS Inst. Inc. Cary, NC).

2.2.2 Essai principal

2.2.2.1. Aliments expérimentaux

Un aliment A apportant 140 % du besoin de P digestible estimé (4,5 g/kg; Jondreville et Dourmad, 2005) et un aliment B apportant 60 % (1,9 g/kg) ont été mélangés pour obtenir

60, 80, 100, 120 ou 140 % des besoins de P (Tableau 3.1, chapitre 3) avec un rapport Ca :P digestible de 2,7. Le P a été analysé par colorimétrie (AOAC, 1990) et le Ca par spectrométrie au plasma (ICP-ES).

2.2.2.2. Dispositif expérimental et mesures

Quatre-vingts porcs mâles (Large White x Landrace, $23,8 \pm 2,7$ kg) ont reçu pendant 28 jours un des cinq traitements expérimentaux servis à l'aide de nourrisseurs automatiques mesurant également quotidiennement l'ingestion (Pomar *et al.*, 2009). Au début et à la fin de l'expérience, les porcs ont été pesés, et huit porcs par traitement ont été radiographiés par DXA pour estimer le CMO et la masse maigre et grasse, lesquels ont été utilisés pour estimer le P, Ca, protéines et lipides corporels selon des équations préétablies (Létourneau-Montminy *et al.*, 2014; Pomar et Rivest, 1996). Une analyse de variance a été réalisée et les effets linéaire, quadratique et cubique de l'apport en P ont été évalués par contrastes orthogonaux (proc MIXED, SAS).

2.3 Résultats et discussion

2.3.1 Essai préliminaire

Les performances de croissance n'étaient pas modifiées par les traitements alimentaires. Le CMO par kg de poids vif était plus bas chez les porcs ayant reçu NRCCa (-6 %; Ca, $P = 0,02$) comparativement à INRACa. Le P excrété dans l'urine différait entre les traitements (Ca x P, $P = 0,003$, Tableau 2.1); les porcs recevant le traitement INRACa-NRCP ont excrété moins de P dans l'urine, ceux recevant NRCCa-NRCP et INRACa-INRAP en excrétant le plus. Ces résultats montrent que le faible niveau de Ca de l'aliment NRCCa-NRCP a limité le dépôt de P et que le P a été légèrement en excès chez les porcs recevant INRAP. Les faibles pertes urinaires de P chez les porcs recevant l'aliment INRACa-NRCP indiquent un dépôt efficace de minéraux dans l'os. Les porcs recevant l'aliment INRACa-INRAP ont été ceux qui ingéraient, absorbaient et retenaient le plus de Ca (Ca x P, $P < 0,05$), mais en rejetaient également le plus (Ca, $P = 0,01$), indiquant que le Ca a été apporté au-delà des besoins pour la minéralisation osseuse. L'aliment 100 % de l'expérience principale s'est donc basé sur la minéralisation osseuse avec le niveau de P de

l'INRA et un rapport Ca :P digestible de 2,7 (voir *Annexe 2*) compte tenu des pertes urinaires importantes avec l'aliment INRACa-INRAP.

Tableau 2.1. Utilisation du phosphore (P) et du calcium (Ca) selon les apports du NRC ou de l'INRA apportés durant l'essai préliminaire¹

Paramètres ²	NRC-Ca		INRA-Ca		Statistiques ³			
	NRC-P	INRA-P	NRC-P	INRA-P	e.t.m.	Ca	P	Ca x P
CMO/PV, g/kg	17,8	19,1	19,5	19,5	0,596	0,02	0,12	0,14
P ingéré, g/d	13,7	16,0	14,6	17,4	0,744	0,16	0,003	0,73
P urine, g/d	1,62	1,05	0,31	1,47	0,253	0,10	0,25	0,003
P absorbé, g/d	8,19	9,73	8,56	10,26	0,469	0,35	0,003	0,86
P retenu, g/d	6,57	8,68	8,24	8,78	0,490	0,05	0,01	0,08
Ca ingéré, g/d	14,6	17,4	18,2	24,7	1,01	< 0,001	< 0,001	0,05
Ca urine, g/d	0,18	0,52	0,58	0,91	0,144	0,01	0,03	0,95
Ca absorbé, g/d	10,2	11,6	12,0	15,5	1,13	< 0,001	< 0,001	0,04
Ca retenu, g/d	10,0	11,1	11,4	14,6	1,13	< 0,001	< 0,001	0,03

¹ Voir le texte pour les teneurs en P et en Ca utilisées.

² Les quantités absorbées ont été calculées en soustrayant les pertes fécales (non présentées ici) de la quantité d'aliments ingérés. Les quantités retenues ont été calculées en soustrayant les pertes urinaires des quantités absorbées.

³ Analyse de variance avec les effets P, Ca et l'interaction Ca x P ; e.t.m : erreur type de la moyenne.

2.3.2 Essai principal

Le gain moyen quotidien (GMQ) (Lin : $P = 0,005$; Tableau 2.2) et la CMJ (Lin : $P = 0,04$) ont augmenté de façon linéaire de 60 à 140 % mais l'IC n'a pas été modifié. Une carence en P est en effet reconnue pour induire une diminution de consommation qui peut se traduire en termes de GMQ (Suttle, 2010). Même si l'effet est linéaire, il est important de noter qu'on observe peu de différence entre les traitements, et des variations intra traitement importantes (8-12%). Le CMO a augmenté de façon linéaire de 60 à 100 %, un plateau a ensuite été observé de 100 à 120 %, suivi d'une seconde augmentation de 120 à 140 % (15 %) (Lin : $P < 0,001$; Qua : $P = 0,03$; Cub : $P = 0,07$). Les besoins en P et en Ca ne semblent donc pas avoir été atteints pour maximiser la minéralisation osseuse. L'excrétion de P était plus faible chez les porcs consommant le traitement 80 % que chez ceux recevant les traitements 60 et 100 %, alors qu'elle augmentait linéairement pour les

traitements 100 à 140 % (Lin : $P < 0,001$; Qua : $P < 0,001$). La plus faible excrétion pour le traitement 80 % provient probablement de meilleures absorption intestinale et rétention corporelle en raison des adaptations connues de l'animal aux faibles apports phosphocalciques (Suttle, 2010) et d'une limitation du P disponible pour l'absorption avec le traitement 60 %. L'évolution cubique de la rétention de P et Ca et la tendance pour le CMO, en raison d'une réaugmentation à 140 %, pourraient provenir d'un meilleur équilibre au niveau du Ca et du P absorbés.

Tableau 2.2. Performances des porcs et composition corporelle de phosphore (P) et de calcium (Ca) durant l'essai principal

Paramètres ¹	Niveaux de phosphore par rapport au besoin, %					Statistiques ²			
	60	80	100	120	140	SEM	Lin	Quad	Cub
GMQ, kg/d	0,946	0,961	1,03	1,007	1,02	0,031	0,005	0,28	0,84
CMJ, g	1850	1847	1927	1921	1981	74,1	0,04	0,84	0,93
CMO final, g	620	824	909	949	1047	42,3	<0,001	0,03	0,067
P retenu, g/d	3,39	4,70	5,24	5,44	6,08	0,212	<0,001	0,005	0,015
P excrété, g/d	4,79	3,80	4,68	5,69	7,72	0,422	<0,001	<0,001	0,37
Ca retenu, g/d	3,12	5,73	6,62	7,12	8,31	0,325	<0,001	0,001	0,002
Ca excrété, g/d	7,72	6,86	9,29	11,8	16,3	0,74	<0,001	<0,001	0,41

¹ Valeurs retenues déterminées par différence entre le contenu de l'animal à la fin et au début de l'essai; valeurs excrétées obtenues par différence entre le P ingéré (calculé à partir de la CMJ et du P contenu dans l'aliment) et le P retenu.

² Analyse de variance avec les effets linéaire (Lin), quadratique (Quad) et cubique (Cub) de l'apport en P; e.t.m : erreur type de la moyenne.

2.4 Conclusions

Des quantités croissantes de P et Ca alimentaires avantagent la minéralisation osseuse et la rétention corporelle de P et de Ca, mais elles augmentent leur excrétion dans l'environnement. Une approche multicritère est donc nécessaire pour établir les besoins en P et en Ca chez le porc en croissance.

2.5 Liste des ouvrages cités

- Jondreville C., Dourmad J.Y. 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- 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., Lovatto P.A., 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.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine 11th edition. National Academy Press, Washington, DC. 400 pages.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.H., Pomar J., Lovatto P.A. 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pigs operations. Braz. J. Anim. Sci., 38, 226-237.
- Pomar C., Rivest J. 1996. The effect of body position and data analysis on the estimation of body composition of pigs by dual energy x-ray absorptiometry (DEXA). Proceedings of the 46th Annual conference of the Canadian Society of Animal Science (Abstr.). p. 26.
- Suttle N.F. 2010. The mineral nutrition of livestock. 4th ed. CABI Publishing, Wallingford, UK. 587 pages.

2.6 Matériel complémentaire

Tableau 2.3. Performances et utilisation du phosphore (P) et du calcium (Ca) chez les porcs en fonction des apports recommandés en P et en Ca selon le NRC ou l'INRA durant l'essai préliminaire¹

Paramètres ²	NRC-Ca		INRA-Ca		Statistiques ³			
	NRC-P	INRA-P	NRC-P	INRA-P	e.t.m.	Ca	P	Ca x P
Poids vif initial, kg	34,2	34,5	32,3	34,0	1,45	0,43	0,51	0,64
Poids vif final, kg	40,8	41,0	38,6	40,6	1,56	0,42	0,49	0,57
GMQ, g/d	860	846	811	834	46,41	0,52	0,92	0,69
CMJ, kg/d	1,74	1,73	1,85	1,94	0,15	0,32	0,79	0,75
IC	2,05	2,03	2,32	2,35	0,20	0,16	0,98	0,90
CMO, g	723	781	754	794	39	0,56	0,21	0,81
CMO/Poids vif, g/kg	17,8	19,1	19,5	19,5	0,60	0,02	0,12	0,14
P ingéré, g/d	13,7	16,0	14,6	17,4	0,74	0,16	0,003	0,73
P fécal, g/d	5,54	6,27	6,01	7,10	0,64	0,32	0,17	0,79
P urine, g/d	1,62	1,05	0,31	1,47	0,25	0,10	0,25	0,003
P absorbé, g/d	8,19	9,73	8,56	10,26	0,47	0,35	0,003	0,86
P retenu, g/d	6,57	8,68	8,24	8,78	0,49	0,05	0,01	0,08
CUD P, %	60,3	60,5	59,2	59,6	3,01	0,76	0,93	0,97
CR P, %	48,8	54,1	57,2	51,1	3,7	0,42	0,90	0,10
P retenu/absorbé, %	80,5	89,4	96,4	85,6	2,4	0,02	0,70	0,001
Ca ingéré, g/d	14,6	17,4	18,2	24,7	1,01	< 0,001	< 0,001	0,05
Ca fécal, g/d	4,38	5,82	6,21	9,18	0,78	0,004	0,01	0,34
Ca urine, g/d	0,18	0,52	0,58	0,91	0,14	0,01	0,03	0,95
Ca absorbé, g/d	10,2	11,6	12,0	15,5	1,13	< 0,001	< 0,001	0,04
Ca retenu, g/d	10,0	11,1	11,4	14,6	1,13	< 0,001	0,0002	0,03
CUD Ca, %	70,4	66,5	66,4	63,2	4,05	0,20	0,21	0,90
CR Ca, %	69,2	63,5	63,0	59,4	4,14	0,06	0,08	0,70
Ca retenu/absorbé, %	98,2	95,5	95,0	94,2	1,11	0,06	0,13	0,39

¹ GMQ, gain moyen quotidien; CMJ, consommation moyenne journalière; IC, indice de consommation; CMO, contenu minéral osseux; CUD, coefficient d'utilisation digestive; CR, coefficient de rétention.

² Le GMQ, la CMJ et l'IC ont été calculés sur les 28 jours de l'essai. Les autres paramètres ont été calculés durant le bilan métabolique.

³ Analyse de variance avec les effets P, Ca et l'interaction Ca x P; e.t.m. : erreur type de la moyenne.

Tableau 2.4. Performances des porcs et composition corporelle de phosphore (P) et de calcium (Ca) durant l'essai principal¹

	Apports de phosphore					e.t.m.	Statistiques ²		
	60	80	100	120	140		Lin	Quad	Cub
n	16	14	16	16	16				
Performance de croissance									
Poids vif initial, kg	23,9	24,4	23,9	23,4	23,8	1,01	0,591	0,936	0,439
Poids vif final, kg	50,4	51,3	52,8	51,7	52,5	1,66	0,225	0,534	0,715
GMQ, kg/d	0,946	0,961	1,03	1,007	1,02	0,031	0,005	0,282	0,836
CMJ, g	1850	1847	1927	1921	1981	74,1	0,042	0,840	0,927
IC	1,97	1,92	1,87	1,91	1,94	0,06	0,594	0,115	0,972
n	8	8	8	8	9				
Composition corporelle									
Condition initiale									
CMO initial, g	384	384	401	401	408	23,5	0,212	0,951	0,841
P initial, g	105	107	110	110	111	5,57	0,179	0,723	0,968
Ca initial, g	140	140	146	146	149	8,53	0,211	0,994	0,844
Condition finale									
CMO final, g	620	824	909	949	1047	42,3	<0,001	0,026	0,067
P final, g	200	238	257	263	282	9,90	<0,001	0,051	0,139
Ca final, g	227	301	331	346	381	15,3	<0,001	0,026	0,068
Balance³									
P retenu, g/d	3,39	4,70	5,24	5,44	6,08	0,2116	<0,001	0,005	0,0145
P excrété, g/d	4,79	3,80	4,68	5,69	7,72	0,422	<0,001	<0,001	0,3723
P retenu, % ingéré	41,4	55,3	53,1	49,2	44,3	1,88	0,919	<0,001	0,0009
P retenu, g/kg gain	3,68	4,98	5,28	5,62	6,09	0,125	<0,001	<0,001	0,0002
Ca retenu, g/	3,12	5,73	6,62	7,12	8,31	0,325	<0,001	0,001	0,0019
Ca excrété, g/d	7,72	6,86	9,29	11,8	16,3	0,736	<0,001	<0,001	0,4119
Ca retenu, % ingéré	28,7	45,5	41,8	37,8	33,9	1,81	0,481	<0,001	<0,001
Ca retenu, g/kg gain	3,39	6,09	6,66	7,36	8,32	0,259	<0,001	<0,001	0,0002

¹ GMQ, gain moyen quotidien; CMJ, consommation moyenne journalière; IC, indice de consommation; CMO, contenu minéral osseux, n, nombre de porcs.

² Analyse de variance avec les effets linéaire (Lin), quadratique (Quad) et cubique (Cub) de l'apport en P; e.t.m : erreur type de la moyenne.

³ Les quantités de P et de Ca retenues (g/d) sont calculées par différence entre les quantités corporelles finales et initiales. Les quantités de P et de Ca excrétées (g/d) sont calculées par différence entre les quantités de P ou de Ca ingérées (non présentées ici) et celles retenues.

CHAPITRE 3
Impact de déséquilibres phosphocalciques sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition

Langlois, J.¹⁻², Pomar C.², Létourneau-Montminy M.P.¹

(1)Département des sciences animales, Université Laval, Québec, Québec, Canada

(2)Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, Québec, Canada

Ce dernier chapitre est constitué d'un second article qui a été publié dans le cadre des 48^e Journées de la Recherche Porcine 2016, qui s'intitule « Impact de déséquilibres phosphocalciques sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition ». L'article comporte certaines modifications par rapport à la version publiée (voir *Annexe 5*), soit l'ajout des résultats d'ostéochondrose. Tout comme l'article court présenté au chapitre 2, l'étude a été réalisée au Centre de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Sherbrooke, Québec.

Résumé

Les effets de différents apports de phosphore (P) (60, 80, 100, 120 et 140 % des besoins de P, et un témoin terrain C+) et un apport déséquilibré de calcium (Ca) (130, 115, 100, 85, 70 % des besoins de Ca et C+) ont été étudiés simultanément en termes de minéralisation osseuse, de rétention corporelle de P et Ca et de performances de croissance chez le porc pendant deux phases d'alimentation de 28 jours chacune. Un aliment A apportant 140 % des besoins en P digestible et un aliment B apportant 60 % de ces mêmes besoins ont été utilisés en mélange pour chaque phase. Le rapport Ca total :P digestible était près de 1,3 et 5,5 pour les aliments A et B des deux phases et de 3,0 et 2,5 dans le C+ pour les phases 2 et 3 respectivement. Quatre-vingt-treize porcs ($51,6 \pm 4,6$ kg) ont reçu un des six traitements alimentaires. Durant les deux phases à l'étude, la consommation était diminuée chez les porcs recevant les apports de P et Ca de 60 et 130 % et C+ comparativement aux porcs des autres traitements ($P < 0,001$). Le contenu minéral osseux était aussi réduit avec les porcs recevant 60 et 130 % de P et Ca respectivement, et maximisé dans le traitement C+ ($P < 0,001$), qui était le seul à apporter des teneurs élevées en P et en Ca. Le manque de Ca pour l'os des porcs recevant 100, 120 et 140 % de P digestible était confirmé par une excrétion de P qui augmentait proportionnellement de 60 à 140 % de l'apport de P digestible ($P < 0,001$). Ces résultats apportent des éléments de compréhension essentiels au développement d'une méthode multicritère de recommandations phosphocalciques chez le porc qui tiendra compte des objectifs de production.

Abstract

The effects of different dietary phosphorus (P) (60, 80, 100, 120 and 140% of P requirements, and a commercial control C+) with dietary calcium (Ca) imbalances (130, 115, 100, 85, 70% of Ca requirements and C+) were studied simultaneously in terms of bone mineralization, P and Ca body retention and growth performance in pigs during two feeding-phases of 28 days each. Feeds A and B contained 140 and 60% respectively of the estimated digestible P requirements and were blended for each feeding phase. Total Ca: digestible P ratios were near 1.3 and 5.5 for feeds A and B of both phases and 3.0 and 2.5 for C+ for phases 2 and 3, respectively. Ninety-three pigs (51.6 ± 4.6 kg) received one of the six dietary treatments. Average daily feed intake decreased for pigs receiving levels of P and Ca of 60 and 130% and C+ in comparison with the other treatments ($P < 0.001$). Bone mineral content was also reduced with pigs receiving 60 and 130% of P and Ca respectively, while it was maximized in C+ pigs ($P < 0.001$), the former being the only ones with high levels of P and Ca. The Ca deficiency in pigs receiving 100, 120 and 140% of digestible P were confirmed by the proportional increase of P excretion in pigs receiving from 60 to 140% of digestible P ($P < 0.001$). These results bring elements of understanding which are essential for the development of a multi-criteria method of estimating P and Ca allowances according to the expected production objective.

3.1 Introduction

Le coût d'alimentation peut représenter jusqu'à 60 % des coûts de production d'un porc charcutier (Pomar et al., 2009). Bien que les méthodes d'estimation de la valeur nutritionnelle des aliments se soient grandement améliorées, une variabilité demeure quant aux valeurs attendues dans les aliments complets. Ceci entraîne l'utilisation de marges de sécurité parfois considérables, pour éviter des diminutions des performances de croissance, lesquelles augmentent les coûts d'alimentation. De plus, pour certains nutriments tels le phosphore (P), ces apports en excès ont des conséquences parfois graves pour l'environnement. L'alimentation de précision est une option intéressante pour réduire les coûts d'alimentation et les rejets de nutriments en permettant d'alimenter quotidiennement chaque porc du troupeau avec la quantité de nutriments dont il a besoin (Pomar *et al.*, 2009). Cependant, pour une application efficace de cette nouvelle méthode d'alimentation, le besoin en P doit être précisément établi. Ceci est complexe compte tenu des multiples critères pouvant servir à définir le besoin (performance, os, excrétion), en plus des nombreux facteurs de variation de son utilisation (Létourneau-Montminy *et al.*, 2014). Ainsi, des études sont nécessaires pour mieux comprendre le devenir du P alimentaire, mais également les facteurs modulant son utilisation par les porcs, notamment les apports de calcium (Ca) alimentaire. De plus, à tort ou à raison, les apports phosphocalciques étant fortement liés à la minéralisation osseuse, ils ont souvent été associés à l'ostéochondrose, qualifiée à maintes reprises d'être la cause principale de la boiterie qui se retrouve fréquemment dans les élevages de porcs commerciaux (van Grevenhof et al., 2012). Différents déséquilibres phosphocalciques ont donc été créés dans cette expérience afin de faire ressortir les effets propres au P et au Ca et leurs interactions en termes de performances de croissance, de minéralisation osseuse, de rejets de P et d'ostéochondrose chez le porc en finition.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Animaux et dispositif expérimental

Quatre-vingt-seize porcs de 54 jours ($23,8 \pm 2,7$ kg) ont reçu pendant trois phases de 28 jours chacune un parmi six traitements expérimentaux à l'aide de nourrisseurs automatiques (Pomar *et al.*, 2009). Les quantités ingérées quotidiennement ont été mesurées individuellement à l'aide des automates. Au début de chacune des phases de croissance et à la fin de l'expérience, huit porcs par traitement, choisis de façon aléatoire au début de l'expérience ont été pesés, anesthésiés et le corps entier a été scanné par absorptiométrie aux rayons X à double intensité (DXA) (DPX-L, Lunar Corp., Madison, WI) pour estimer le contenu minéral osseux (CMO) et la masse maigre et grasse, lesquels ont été utilisés pour estimer le P, le Ca, les protéines et les lipides corporels selon des équations préétablies (Pomar et Rivest, 1996; Létourneau-Montminy *et al.*, 2014). Des échantillons sanguins ont également été prélevés avant les scans dans des tubes Vacutainer contenant 100 USP d'héparine de sodium, stockés sur la glace puis centrifugés. Le jour de l'abattage, la démarche des porcs a été observée à la sortie du camion pour détecter les boiteries. Après l'abattage, l'épaule, le jarret, le pied et le jambon droits ont été prélevés sur chacun des porcs pour effectuer un diagnostic visuel macroscopique de l'OC au niveau de sept articulations choisies à partir de la littérature (Figure 3.1). Le diagnostic consistait en : 0 – aucune lésion, 1 – lésion légère et 2 – lésion sévère. Le processus d'évaluation a été fait par la même personne pour toutes les articulations. De plus, tous les reins ont été recueillis afin de détecter tout signe d'anomalies ou de calculs urinaires.

3.2.2 Aliments expérimentaux

Pour la première phase de croissance, deux régimes granulés à base de maïs et de tourteau de soja ont été utilisés, soit un aliment A apportant 140 % du besoin de P digestible et de Ca (besoin estimé d'après Jondreville et Dourmad, 2005) et un aliment B en apportant 60 %. Les aliments A et B ont été mélangés pour en arriver à cinq traitements alimentaires déterminant 60, 80, 100, 120 ou 140 % des besoins de P, et un témoin « terrain » C+, avec un Ca apporté à un rapport fixe de 2,7 fois le P digestible (Tableau 3.1).

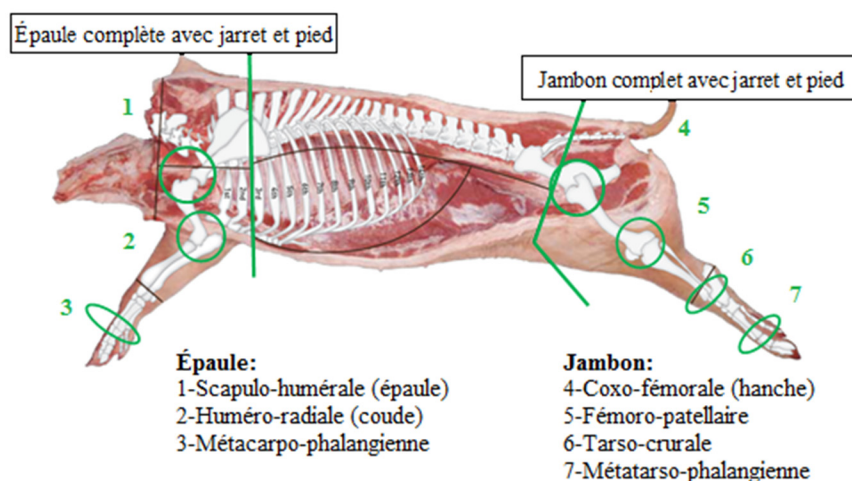


Figure 3.1. Carcasse de porc sur laquelle sont identifiées les sept articulations ciblées au niveau de l'épaule, du jarret et des pieds.

Pour les phases 2 et 3 (P2 et P3), une inversion des quantités de Ca des aliments A et B s'est produite lors de la fabrication, occasionnant des rapports Ca:P digestible de 1,3 et 5,5 pour les aliments A et B, respectivement (Tableau 3.1). Le rapport Ca:P digestible diminuait de ce fait avec l'augmentation de P alors que le C+ présentait des teneurs élevées en P et en Ca durant les trois phases de croissance tel qu'attendu. Ainsi, dans les aliments complets et selon les valeurs analysées, le P varie de 60 à 140 % du besoin conjointement à des variations de Ca de 130 à 70 % alors que le C+ apporte 140 % des besoins pour les deux minéraux. Les traitements alimentaires correspondants sont identifiés dans ce document par 60-130, 80-115, 100-100, 120-85, 140-70 et C+ (ou 120-140 pour P2 et 145-140 pour P3). Leurs rapports respectifs de Ca total:P digestible sont de 5,42, 3,58, 2,48, 1,74, 1,22 et 2,93 (C+) pour la P2 et de 5,50, 3,67, 2,58, 1,84, 1,32 et 2,48 (C+) pour la P3.

3.2.3. Analyses de laboratoire

Les aliments et les échantillons de plasma sanguin ont été analysés pour connaître leur teneur en matières azotées totales. Le P a été analysé par colorimétrie (AOAC, 1990) et le Ca par spectrométrie au plasma (ICP-ES).



3.2.4. Analyses statistiques

Une analyse de variance a été réalisée par phase avec le traitement comme effet principal et l'animal comme unité expérimentale, et les moyennes des traitements ont été évaluées avec des comparaisons multiples au moyen de la procédure MIXED de SAS (SAS 9.4, 2002, Inst. Inc. Cary, NC) en utilisant le test de Tukey. Les différences sont considérées comme significatives lorsque $P < 0,05$, et une valeur de $P \leq 0,10$ dénote une tendance statistique. Pour la comparaison des résultats d'OC, le test de Cochran-Mantel-Haenszel (CMH) de la procédure FREQ de SAS a été utilisé.

Tableau 3.1. Aliments expérimentaux¹

Item Ingrédients, % matière fraîche	Phase 1			Phase 2			Phase 3		
	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3
Maïs	52,6	57,3	54,6	62,5	61,8	60,3	67,9	66,5	65,3
Tourteau de soya	24,7	24,1	24,4	18,8	18,9	19,1	14,6	14,8	15,0
Blé	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Phosphate monocalcique	1,69	0,39	1,19	1,18	0,18	0,93	0,91	0,11	0,96
Graisse d'origine animale	2,30	0,80	1,70	0,70	0,90	1,40	-	0,50	0,70
Sel	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51	0,50	0,51	0,51	0,51
Sulfate de lysine	0,5	0,52	0,51	0,49	0,49	0,49	0,4	0,4	0,39
Pierre à chaux	2,3	0,88	1,59	0,3	1,72	1,74	0,29	1,82	1,8
L-Thréonine	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,08
D,L-Méthionine	0,1	0,09	0,1	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07
L-Thryptophane	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	0,01
Prémix vitamines et minéraux	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,20	0,20	0,20
Composition chimique, %²									
Ca	1,21	0,57	0,91	0,41	0,78	0,85	0,37	0,66	0,72
P total	0,68	0,43	0,56	0,54	0,37	0,49	0,52	0,32	0,42
P digestible	0,45	0,19	0,35	0,34	0,14	0,29	0,28	0,12	0,29
Ca/P digestible	2,70	2,97	2,60	1,22	5,42	2,93	1,32	5,50	2,48

¹ A : aliment à 140 % du besoin en P et Ca; B : aliment à 60 % du besoin en P et Ca; C : aliment correspondant aux apports utilisés sur le terrain.

² Valeurs analysées sauf pour le P digestible qui a été calculé à partir de Sauvante et al., (2004).

3.3 Résultats

Les résultats concernant la première phase d'alimentation sont présentés au chapitre 2.

3.3.1 Phase 2

Les poids initiaux n'étaient pas différents entre les traitements alors que les poids finaux différaient jusqu'à 6 % par rapport à la moyenne ($P < 0,05$; Tableau 3.2). Ainsi, les porcs ayant reçu le traitement 60-130 étaient les moins lourds et ceux ayant reçu le traitement 80-115 avaient un poids intermédiaire ($P = 0,02$). Le gain moyen quotidien (GMQ) augmentait entre les traitements 60-130 à 100-100 puis atteignait un plateau ($P < 0,001$) pour des apports de P supérieurs. La consommation moyenne journalière (CMJ) augmentait entre les traitements 60-130 à 100-100 puis atteignait un plateau entre les traitements 100-100 et 140-70 ($P < 0,001$). La CMJ pour le C+ n'était pas différente des traitements 60-130 et 80-115. L'indice de conversion alimentaire (IC) était plus faible pour les traitements 140-70 et C+, comparativement aux autres traitements qui étaient similaires ($P < 0,001$).

Au début de la phase, le CMO, le P et le Ca corporels différaient entre les traitements ($P < 0,001$) avec les porcs recevant les traitements 140-70 et C+ présentant les valeurs les plus élevées. À la fin de la phase, les porcs recevant les traitements 60-130 et C+ présentaient respectivement les valeurs les plus faibles et les plus élevées par rapport aux autres porcs pour ces mesures ($P < 0,001$).

Le P ingéré augmentait avec les apports de P pour les traitements 60-130 à 140-70 et était au niveau du 100-100 pour les porcs du traitement C+ ($P < 0,001$). Le P retenu était respectivement le plus faible et le plus élevé ($P < 0,001$) pour les traitements 60-130 et C+, soit une différence de 71 %. L'excrétion de P augmentait des traitements 60-130 à 140-70 et l'excrétion des porcs recevant le traitement C+ était équivalente à celles pour les traitements 80-115 et 100-100 ($P < 0,001$). Les porcs recevant le traitement C+ étaient ceux qui consommaient le plus de Ca ($P < 0,001$) alors que les valeurs étaient similaires pour les 60-130 et 80-115 puis diminuaient par la suite. Le Ca retenu était supérieur pour les animaux du traitement C+, comparé aux traitements 80-115, 100-100 et 120-85 qui renaient autant le Ca, suivis des traitements 140-70 et 60-130 ($P < 0,001$). L'excrétion de

Ca était la plus élevée pour les traitements 60-130 et 80-115, les porcs du traitement C+ étant intermédiaires. Elle diminuait ensuite avec la diminution du Ca de 100-100 à 140-70 ($P < 0,001$). Le P plasmatique était le plus faible chez les porcs du traitement 60-130 comparativement aux autres traitements qui présentaient des valeurs similaires ($P < 0,001$). Le Ca plasmatique diminuait de façon linéaire entre les traitements 60-130 à 100-100 et atteignait un plateau ensuite ($P < 0,001$).

3.3.2 Phase 3

À la fin de la phase 3, les poids des porcs étaient différents entre les traitements ($P < 0,001$; Tableau 3.3); les porcs du traitement 60-130 ayant un poids inférieur aux autres, ceux du traitement 80-115 ayant un poids intermédiaire, et ceux des traitements 100-100 à C+ ayant un poids similaire. Le GMQ augmentait entre les traitements 60-130 à 100-100 et atteignait un plateau ensuite ($P < 0,001$). La CMJ était plus basse pour les porcs du traitement 60-130 et intermédiaire pour ceux du traitement C+ ($P < 0,001$). Elle atteignait ensuite un plateau pour ceux de 80-115 à 140-70. L'IC était plus faible pour les traitements 140-70 et C+, comparativement aux autres traitements qui n'étaient pas différents ($P < 0,008$).

Du début à la fin de la phase 3, le CMO est demeuré inférieur pour les animaux du traitement 60-130 et supérieur pour ceux du traitement C+ ($P < 0,001$). Il a aussi augmenté linéairement du traitement 60-130 au traitement 100-100 pour ensuite atteindre un plateau jusqu'au traitement 140-70. Le P et le Ca corporels, qui évoluaient de la même façon entre les traitements, augmentaient linéairement entre les porcs des traitements 60-130 à 100-100, pour ensuite atteindre un plateau jusqu'à ceux du traitement 140-70 ($P < 0,001$). Les porcs du traitement C+ accumulaient les quantités corporelles les plus élevées. Le P ingéré augmentait linéairement avec les apports en P ($P < 0,001$) pour les porcs des traitements 60-130 à 140-70, la valeur pour le traitement C+ étant similaire à celle pour le traitement 100-100. Le P retenu était moins élevé pour les porcs du traitement 60-130% et plus élevé pour ceux du traitement C+ ($P < 0,001$), avec une différence de 93 % entre les deux. L'excrétion de P augmentait linéairement avec l'augmentation de l'apport en P ($P < 0,001$). Les porcs du traitement C+ étaient intermédiaires entre ceux du

traitement 60-130 et ceux des traitements 80-115 et 100-100. Le Ca retenu était moins élevé pour les porcs du traitement 60-130, puis augmentait jusqu'au traitement 100-100 ($P < 0,001$). Les porcs du traitement 140-70 retenaient autant le Ca que ceux du traitement 80-115, et ceux du traitement 120-85 étaient intermédiaires entre les porcs du traitement 100-100 et ceux du traitement 140-70. Les porcs recevant le traitement C+ étaient ceux qui retenaient le plus de Ca. L'excrétion de Ca augmentait linéairement avec l'augmentation de l'apport en Ca, et conjointement à la diminution de l'apport en P ($P < 0,001$). Elle était donc la plus élevée avec les porcs du traitement 60-130, et la plus faible pour ceux du traitement 140-70. Les porcs du traitement C+ étaient intermédiaires entre ceux du traitement 60-130 et ceux du traitement 80-115. Le P plasmatique était encore une fois plus faible chez les animaux du traitement 60-130, suivis de ceux recevant le traitement 80-115, puis similaire entre les porcs des autres traitements ($P < 0,001$). Le Ca plasmatique diminuait du traitement 60-130 jusqu'au traitement 100-100 puis atteignait un plateau par la suite ($P < 0,001$).

Aucune boiterie n'a été observée à l'arrivée à l'abattoir. Bien que certaines articulations présentaient des signes d'OC, ils n'étaient pas associés aux traitements (résultats non montrés). Le GMQ des porcs n'a pas non plus influencé l'OC. Toutefois, la fréquence des cotes 1 et 2 était de 35 % et 13 % respectivement. De plus, l'articulation du coude (huméro-radiale) était la plus touchée avec 20 % des cotes 1 et 2. Les articulations de la hanche (scapulo-humérale), la métacarpo-phalangienne et la métatarso-phalangienne ont toutes obtenu le score 0. Celles ayant obtenu la plus grande fréquence de forme sévère d'OC (cote 2) étaient les articulations du coude et du jarret (tarso-crurale) (8 % et 5 % respectivement). Finalement, aucune anomalie n'a pu être détectée sur les reins des porcs.

Tableau 3.2. Performances de croissance, minéralisation osseuse et bilan phosphocalcique des porcs en fonction des apports alimentaires en P et en Ca durant la phase 2¹

P, % besoin	60	80	100	120	140	120 (C+)	ETR	Probabilité ²
Ca, % besoin	130	115	100	85	70	140		
Phase 2³								
Poids vif initial, kg	50,8	51,5	52,7	52,2	52,5	52,8	1,7	0,815
Poids vif final, kg	82,2 ^b	85,4 ^{ab}	89,6 ^a	87,7 ^a	89,2 ^a	88,1 ^a	2,4	0,019
GMQ, kg/d	1,12 ^c	1,21 ^b	1,32 ^a	1,27 ^{ab}	1,31 ^a	1,26 ^{ab}	0,04	<0,001
CMJ, g/d	2722 ^d	3003 ^{bc}	3219 ^a	3190 ^{ab}	3077 ^{ab}	2842 ^{cd}	106	<0,001
IC	2,44 ^{ab}	2,49 ^a	2,45 ^{ab}	2,52 ^a	2,35 ^{bc}	2,25 ^c	0,06	<0,001
CMO initial, g	620 ^d	830 ^c	909 ^{bc}	949 ^b	1047 ^a	972 ^{ab}	42	<0,001
P initial, g	200 ^d	240 ^c	257 ^{bc}	263 ^b	282 ^a	271 ^{ab}	10	<0,001
Ca initial, g	227 ^d	303 ^c	331 ^{bc}	346 ^{bc}	381 ^a	354 ^{ab}	15	<0,001
Protéine corporelle initiale, kg	8,40	8,65	8,88	8,74	8,87	9,14	0,27	0,127
CMO final, g	890 ^d	1282 ^c	1415 ^{bc}	1393 ^{bc}	1425 ^b	1610 ^a	67	<0,001
P final, g	303 ^d	380 ^c	409 ^{bc}	403 ^{bc}	411 ^b	447 ^a	15	<0,001
Ca final, g	327 ^d	468 ^c	516 ^{bc}	508 ^{bc}	520 ^b	587 ^a	24	<0,001
Protéine corporelle finale, kg	13,5 ^c	14 ^{bc}	14,6 ^{ab}	14,4 ^{ab}	14,5 ^{ab}	14,9 ^a	0,4	0,018
P ingéré, g/d	9,87 ^d	12,7 ^c	14,4 ^b	15,7 ^{ab}	16,9 ^a	14,3 ^b	0,7	<0,001
P retenu, g/d	3,70 ^d	4,98 ^{bc}	5,45 ^b	5,03 ^{bc}	4,60 ^c	6,31 ^a	0,25	<0,001
P excrété, g/d	6,17 ^e	6,68 ^d	9,00 ^c	10,6 ^b	12,3 ^a	8,03 ^{cd}	0,58	<0,001
Ca ingéré, g/d	20,8 ^b	21,1 ^b	18,9 ^c	15,8 ^d	12,8 ^e	24,9 ^a	0,9	<0,001
Ca retenu, g/d	3,57 ^d	5,91 ^b	6,60 ^b	5,81 ^b	4,95 ^c	8,31 ^a	0,44	<0,001
Ca excrété, g/d	17,2 ^a	15,2 ^b	12,3 ^c	10,0 ^d	7,87 ^e	16,6 ^{ab}	0,7	<0,001
Ca plasma final, mg/L	107 ^a	101 ^b	94,1 ^{cd}	94,7 ^{cd}	93,8 ^d	97,2 ^{cd}	1,8	<0,001
P plasma final, mg/L	121 ^b	134 ^a	140 ^a	138 ^a	138 ^a	141 ^a	4	<0,001

¹ C+, aliment « terrain »; GMQ, gain moyen quotidien; CMJ, consommation moyenne journalière; IC, indice de consommation; CMO, contenu minéral osseux corporel.

² ETR : écart-type résiduel du modèle. Comparaisons multiples; des lettres différentes sur une même ligne indiquent une différence significative ($P < 0,05$).

³ Le P, le Ca et les protéines corporelles ont été estimés à partir d'équations préétablies (Pomar et Rivest, 1996; Létourneau-Montminy et al., 2014). Les équations utilisées considèrent que le contenu minéral osseux contient 18 % P et 36 % Ca, et que le tissu maigre contient 1,014 % P et 0,042 % Ca pour le calcul des protéines corporelles (Nielsen et al., 1973). Les quantités de P et de Ca retenues ont été calculées par différence entre les quantités corporelles de P et de Ca finales et initiales. Les quantités de P et de Ca excrétées ont été calculées par différence entre les quantités de P ou de Ca ingérées et celles retenues.

Tableau 3.3. Performances de croissance, minéralisation osseuse et bilan phosphocalcique des porcs en fonction des apports alimentaires en P et en Ca durant la phase 3¹

P, % besoin	60	80	100	120	140	145 (C+)	ETR	Probabilité ²
Ca, % besoin	130	115	100	85	70	140		
Phase 3 ³								
Poids vif initial, kg	82,2 ^b	85,4 ^{ab}	89,6 ^a	87,7 ^a	89,2 ^a	88,1 ^a	2,4	0,019
Poids vif final, kg	111 ^c	117 ^b	125 ^a	122 ^{ab}	124 ^a	122 ^{ab}	3	<0,001
GMQ, kg/d	1,02 ^c	1,13 ^b	1,25 ^a	1,22 ^a	1,25 ^a	1,21 ^{ab}	0,04	<0,001
CMJ, g/d	3272 ^c	3592 ^{ab}	3816 ^a	3819 ^a	3699 ^{ab}	3556 ^b	132	<0,001
IC	3,21 ^a	3,19 ^a	3,05 ^{ab}	3,12 ^{ab}	2,95 ^b	2,95 ^b	0,09	0,008
CMO initial, g	890 ^d	1282 ^c	1415 ^{bc}	1393 ^{bc}	1425 ^b	1610 ^a	67	<0,001
P initial, g	303 ^d	380 ^c	409 ^{bc}	403 ^{bc}	411 ^b	447 ^a	15	<0,001
Ca initial, g	327 ^d	468 ^c	516 ^{bc}	508 ^{bc}	520 ^b	587 ^a	24	<0,001
Protéine corporelle initiale, kg	13,5 ^c	14 ^{bc}	14,6 ^{ab}	14,4 ^{ab}	14,5 ^{ab}	14,9 ^a	0,4	0,018
CMO final, g	1271 ^d	1895 ^c	2141 ^b	2051 ^{bc}	2022 ^{bc}	2504 ^a	102	<0,001
P final, g	412 ^d	539 ^c	592 ^b	571 ^{bc}	570 ^{bc}	659 ^a	21	<0,001
Ca final, g	466 ^d	691 ^c	780 ^b	748 ^{bc}	737 ^{bc}	911 ^a	37	<0,001
Protéine corporelle finale, kg	17,1 ^c	18,3 ^b	19,1 ^a	18,6 ^{ab}	18,9 ^{ab}	19,34 ^a	0,48	<0,001
P ingéré, g/d	9,81 ^c	13,1 ^d	15,1 ^c	16,9 ^b	18,6 ^a	14,7 ^c	0,7	<0,001
P retenu, g/d	3,92 ^d	5,69 ^c	6,52 ^b	5,99 ^{bc}	5,70 ^c	7,57 ^a	0,35	<0,001
P excrété, g/d	5,89 ^d	7,41 ^c	8,58 ^c	10,9 ^b	12,9 ^a	7,16 ^{cd}	0,73	<0,001
Ca ingéré, g/d	20,2 ^b	20,8 ^b	18,5 ^c	15,9 ^d	13,2 ^c	25,2 ^a	0,8	<0,001
Ca retenu, g/d	4,97 ^d	7,97 ^c	9,43 ^b	8,55 ^{bc}	7,77 ^c	11,6 ^a	0,6	<0,001
Ca excrété, g/d	15,3 ^a	12,8 ^b	9,08 ^c	7,35 ^c	5,47 ^d	13,7 ^{ab}	0,9	<0,001
Ca plasma final, mg/L	112 ^a	98,6 ^b	92,7 ^c	93,0 ^c	92,0 ^c	92,1 ^c	2,4	<0,001
P plasma final, mg/L	115 ^c	125 ^b	134 ^a	132 ^{ab}	129 ^{ab}	129 ^{ab}	4	<0,001

¹ C+, aliment « terrain »; GMQ, gain moyen quotidien; CMJ, consommation moyenne journalière; IC, indice de consommation; CMO, contenu minéral osseux corporel.

² ETR : écart-type résiduel du modèle. Comparaisons multiples; des lettres différentes sur une même ligne indiquent une différence significative ($P < 0,05$).

³ Le P, le Ca et les protéines corporelles ont été estimés à partir d'équations préétablies (Pomar et Rivest, 1996; Létourneau-Montminy et al., 2014). Les équations utilisées considèrent que le contenu minéral osseux contient 18 % P et 36 % Ca, et que le tissu maigre contient 1,014 % P et 0,042 % Ca pour le calcul des protéines corporelles (Nielsen et al., 1973). Les quantités de P et de Ca retenues ont été calculées par différence entre les quantités corporelles de P et de Ca finales et initiales. Les quantités de P et de Ca excrétées ont été calculées par différence entre les quantités de P ou de Ca ingérées et celles retenues.

3.4 Discussion

La CMJ était plus faible pour les porcs consommant les apports de Ca les plus élevés (60-130 et C+) et ce, indépendamment des apports de P. Au niveau digestif, le Ca peut se lier aux molécules de P, notamment avec les phosphates, et former des complexes insolubles et donc non absorbables (Heaney et Nordin, 2002). Ainsi, plus l'apport de P est faible, plus l'effet négatif du Ca aura un impact sur les quantités absorbées et utilisables par l'animal tel que montré par Reinhart et Mahan (1986).

La carence en P est reconnue pour induire une baisse d'appétit chez plusieurs espèces (Suttle, 2010). Cependant, le fait qu'on observe une diminution de la consommation chez les C+ également, montre un effet propre du Ca. Avec des porcs de même poids et recevant des apports de Ca et de P similaires, Eeckhout et al. (1995) ont obtenu des effets négatifs d'apports faibles de P sur la consommation indépendamment des apports de Ca. Il est cependant à noter qu'ils n'ont pas observé d'effets des traitements sur la calcémie, ce qui était le cas ici.

Chez le poulet, un appétit calcique, soit une consommation plus élevée d'une source de Ca lorsque les apports de Ca sont faibles, a été montré (Lobaugh et al., 1981; Wilkinson et al., 2013). Cette régulation de la consommation de Ca serait fonction de la calcémie. Ainsi, il est possible qu'en raison de l'augmentation de calcémie induite par les aliments 60-130 et 80-115, les porcs aient réduit leur consommation. Cependant, ceci n'a pas été suffisant pour empêcher la calcémie d'augmenter. Les porcs du traitement C+ consommaient moins, mais n'avaient pas d'augmentation de calcémie. Ceci pourrait s'expliquer par un dépôt accru de Ca dans l'os, soit par exemple 8,3 g/d comparativement à 6,6 g/d de Ca retenu pour les animaux du traitement 100-100 de la phase 2, compte tenu d'un apport de P balancé (Tableau 3.2). Les modifications de calcémie confirment également que la régulation via la calcitonine, une hormone hypocalcémisante, n'est pas totalement efficace chez le porc (Pointillart et al., 1987). Vipperman et al. (1974) auraient également remarqué que les concentrations de P et de Ca plasmatiques ne sont pas des indicateurs très précis pour analyser l'adéquation des deux minéraux dans l'aliment. La vitamine D active pourrait s'avérer intéressante pour mesurer l'effet des différents apports de P et de Ca dans la ration.

Les résultats concernant les concentrations plasmatiques du cholécalférol seront présentés ultérieurement pour cet essai.

Les effets de la CMJ se traduisaient en termes de GMQ seulement lorsque l'apport de P était faible conjointement à un apport élevé de Ca, les porcs recevant le traitement C+ présentant un GMQ élevé malgré une CMJ diminuée. Cela indique que c'était bien le P l'élément le plus limitant et responsable de la diminution des performances de croissance. Ceci est bien illustré par le P plasmatique qui était réduit chez les porcs des traitements 60-130. Il est également important de noter que les résultats de composition corporelle par DXA montrent une diminution de la protéine corporelle chez les porcs du traitement 60-130. Ceci est en accord avec le fait qu'environ 30 % du P corporel se retrouve dans les tissus mous, principalement les muscles (Nielsen, 1973). Étant donné que le GMQ n'était pas diminué chez les porcs du traitement C+ malgré une diminution de la consommation, l'IC était le plus faible chez les porcs consommant ce traitement.

Les effets de P sur les performances de croissance sont variables, certains auteurs ayant observé des effets (Cromwell et al., 1993; Ekpe et al., 2002; Létourneau-Montminy et al., 2012) et d'autres non (Hastad et al., 2004; Pomar et al., 2006) avec des apports de P similaires à ceux de la présente étude. Ceci pourrait s'expliquer en partie par les apports de Ca. En effet, on observe un effet plus marqué de la carence en P lorsque les apports de P varient alors que celui de Ca est fixe (Cromwell et al., 1993; Ekpe et al., 2002) en raison de l'interaction digestive discutée plus tôt. Les porcs recevant les aliments 60-130 et 80-115 présentaient des CMO plus faibles que les autres, et ce, malgré des apports de Ca qui dépassaient les besoins. Ceci confirme que le déficit en P limitait le dépôt osseux du Ca et l'interdépendance de ses deux minéraux pour la minéralisation osseuse (Crenshaw, 2001). L'important besoin en P et en Ca, et ce, dans les bonnes proportions est également bien illustré durant les deux phases par le traitement C+ qui maximisait la minéralisation osseuse.

L'excrétion de P augmentait de façon linéaire des traitements 60-130 à 140-70, alors que le dépôt corporel plafonnait dès 100-100. Il est bien connu que les apports faibles de Ca ne

permettent pas de déposer le P au niveau osseux; le P non déposé est perdu dans les urines (Pointillart et Fontaine, 1983; Létourneau-Montminy et al., 2010). Ainsi, la diminution des apports de Ca conjointement à l'augmentation des apports de P explique une excrétion élevée de P chez les porcs 120-85 et 140-70.

D'un point de vue pratique, on note que les rapports Ca:P digestible étaient similaires dans les aliments 100-100 et C+, mais leurs résultats de performances étaient bien distincts. En effet, les porcs recevant le traitement C+ présentaient un IC plus faible (-8 % en P2), compte tenu d'une CMJ diminuée, ainsi qu'une minéralisation plus élevée (+14 % en P2). Ainsi, l'utilisation d'un rapport Ca:P digestible en formulation n'est valable que pour un niveau de P digestible donné. Ce résultat montre de plus que les recommandations actuelles (Jondreville et Dourmad, 2005) ne maximisent probablement pas la minéralisation osseuse.

Le traitement C+ est utilisé sur le terrain pour l'alimentation des truies de remplacement. Bien que les apports de P et de Ca soient très élevés tout au long de la croissance, ils permettent une meilleure minéralisation osseuse et une excrétion de P comparable au traitement 100-100 compte tenu d'une meilleure rétention. Néanmoins, l'effet négatif d'apports élevés en Ca sur la consommation est préoccupant. En effet, advenant une sous-estimation d'un autre nutriment, le GMQ, pourrait être affecté. De plus, il n'est pas certain que de tels apports soient nécessaires chez le porc charcutier.

Cette étude suggère que les apports phosphocalciques ne seraient pas en lien avec les problèmes d'OC en accord avec les travaux de Kornegay et al. (1989) et Crenshaw (2003). De plus, bien que plusieurs études aient déjà observé une relation positive entre la vitesse de croissance du porc et la fréquence d'OC (Busch and Wachmann, 2011; van Grevenhof et al., 2012, de Koning et al., 2012), cela n'a pas été le cas dans cette expérience tout comme dans celles de Crenshaw (2003) et Ytrehus et al. (2004). L'absence de boiterie est en accord avec les travaux de Jorgensen et al. (1995) et Stavarakakis et al. (2014) indiquant que ce ne sont pas tous les porcs atteints d'OC qui vont nécessairement montrer des signes de boiterie en raison d'un degré moindre de sévérité de la pathologie. Nos résultats ne permettent pas de faire ressortir les causes de l'OC, ni de la détecter sur l'animal vivant. Ils attirent

toutefois l'attention sur l'articulation du coude, qui a obtenu la fréquence la plus élevée d'OC parmi toutes les articulations étudiées, et elle est aussi celle où la forme sévère de l'OC a été identifiée le plus fréquemment. Ceci a également été observé par d'autres auteurs (Jorgensen et al., 1995; van Grevenhof, 2012; de Koning et al., 2014). De plus, tel qu'observé par Stavrakakis et al. (2014), trois articulations ont été exemptes d'OC, soit la hanche (localisation scapulo-humérale), la métacarpo-phalangienne et la métatarso-phalangienne. Par conséquent, une attention particulière devrait être portée sur l'articulation du coude lors d'études ultérieures sur les causes de l'OC chez le porc.

3.5 Conclusions

Les résultats de la présente étude confirment la relation complexe qui existe entre le P et le Ca alimentaires. Ainsi, on observe que certains paramètres de croissance, tels que la CMJ, peuvent être affectés indépendamment par l'un ou l'autre de ces minéraux majeurs, alors que pour d'autres paramètres, tels que le CMO, les effets sont interdépendants. De plus, certains apports de ces minéraux vont maximiser les performances de croissance aux dépens de la minéralisation osseuse, exigeant un compromis. Quoi qu'il en soit, le maintien de l'équilibre dans les apports est important. Les résultats montrent également que le rapport Ca:P digestible doit être réfléchi en considérant l'apport de P. La modulation de la consommation via la calcémie soulève des questions et nécessiterait des études supplémentaires mais pourrait toutefois expliquer en partie les baisses de performances observées avec des apports élevés de Ca. Néanmoins, ces résultats mettent en phase la nécessité de développer une approche multicritère permettant de moduler les apports phosphocalciques en fonction de l'objectif de production. Les résultats d'OC ne montrent quant à eux aucune relation avec les apports phosphocalciques dans cette étude. La présence d'OC dans le troupeau n'a pas non plus pu être reliée au gain de poids des animaux ni à des problèmes de boiterie.

3.6 Liste des ouvrages cités

- Busch M.E., Wachmann H. 2011. Osteochondrosis of the elbow joint in finishing pigs from three herds: Associations among different types of joint changes and between osteochondrosis and growth rate. *Vet. J.*, 118, 197-203.
- Crenshaw T.D. 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: A.J. Lewis & L.L. Southern (Eds), *Swine nutrition second edition*, 187-212. CRC Press, Florida, USA.
- Crenshaw T.D. 2003. Nutritional manipulation of bone mineralization in developing gilts. Allen D. Lemans Swine Conference. University of Minnesota, Minneapolis, United States.
- Cromwell G.L., Stahly T.S., Coffey R.D., Monegue H.J., Randolph J.H. 1993. Efficacy of phytase in improving the bioavailability of phosphorus in soybean meal and corn-soybean meal diets for pigs. *J. Anim. Sci.*, 71, 1831-1840.
- de Koning D.B., van Grevenhof E.M., Laurensen B.F.A., van Weeren P.R., Hazeleger W., Kemp B. 2014. The influence of floor type before and after 10 weeks of age on osteochondrosis in growing gilts. *J. Anim. Sci.*, 92, 3338-3347.
- Eeckhout W., de Paepe M., Warnants N., Bekaert H. 1995. An estimation of the minimal P requirements for growing-finishing pigs, as influenced by the Ca level of the diet. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 52, 29-40.
- Ekpe E.D., Zijlstra R.T., Patience J.F. 2002. Digestible phosphorus requirement of grower pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 541-549.
- Hastad C.W., Dritz S.S., Tokach M.D., Goodband R.D., Nelssen J.L., DeRouchey J.M., Boyd R.D., Johnston M.E. 2004. Phosphorus requirements of growing-finishing pigs reared in a commercial environment. *J. Anim. Sci.*, 82, 2945-2952.
- Heaney R.P., Nordin B.E.C. 2002. Calcium effects on phosphorus absorption: Implications for the prevention and co-therapy of osteoporosis. *J. Am. Coll. Nutr.*, 21, 239-244.
- Jondreville C., Dourmad J.Y. 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Jorgensen B., Arnbjerg J., Aaslyng M. 1995. Pathological and radiological investigations on osteochondrosis in pigs, associated with leg weakness. *J. Vet. Med.*, 42, 489-504.

- Kornegay E.T., Combs N.R., Veit H.P., Lindemann M.D. 1989. Articular cartilage condition score of distal humerus and femur of swine as influenced by dietary Ca-P levels, sex and age. *Can J. Anim.*, 70, 255-258.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Magnin M., Sauvant D., Bernier J.F., Pomar C., Jondreville C. 2010. Effect of reduced dietary calcium concentration and phytase supplementation on calcium and phosphorus utilization in weanling pigs with modified mineral status. *J. Anim. Sci.*, 88, 1706-1717.
- 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.
- Lobaugh B., Joshua I.G., Mueller W.J. 1981. Regulation of calcium appetite in broiler chickens. *J. Nutr.*, 111, 298-306.
- Nielsen A.J. 1973. Anatomical and Chemical Composition of Danish Landrace Pigs Slaughtered at 90 Kilograms Live Weight in Relation to Litter, Sex and Feed Composition. *J. Anim. Sci.*, 36, 476-483.
- Pointillart A., Fontaine N. 1983. Effet de deux régimes hypocalcémisants sur la rétention et l'absorption de phosphore et du calcium chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 15, 375-384.
- 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.
- Pomar C., Rivest J. 1996. The effect of body position and data analysis on the estimation of body composition of pigs by dual energy x-ray absorptiometry (DEXA). *Proceedings of the 46th Annual conference of the Canadian Society of Animal Science (Abstr.)*. pp. 26.
- Pomar C., Jondreville C., Dourmad J.Y., Bernier J. 2006. Influence du niveau de phosphore des aliments sur les performances zootechniques et la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer et zinc chez le porc de 20 à 100 kg de poids vif. *Journées Rech. Porcine*, 38, 209-216.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.H., Pomar J., Lovatto P.A. 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pigs operations. *Braz. J. Anim. Sci.*, 38, 226-237.

- Reinhart G.A., Mahan D.C. 1986. Effect of various calcium:phosphorus ratios at low and high dietary phosphorus for starter, grower and finishing swine. *J. Anim. Sci.*, 63, 457-466.
- Sauvant D., Perez M., Tran G. 2004. Tables of composition and nutritional value of feed materials. INRA, Association Française de Zootechnie, Paris, 304 pages.
- Suttle N.F. 2010. The mineral nutrition of livestock. 4th ed. CABI Publishing, Wallingford, UK, 587 pages.
- Stavarakakis S., Guy J.H., Warlow O.M.E., Johnson G.R., Edwards S.A. 2014. Walking Kinematics of growing pigs associated with differences in musculoskeletal conformation, subjective gait score and osteochondrosis. *Livest. Sci.*, 165, 104-113.
- van Grevenhof, E.M., Heuven, H.C.M., van Weeren, P.R., Bijma, P. 2012. The relationship between growth and osteochondrosis in specific joints in pigs. *Livest. Sci.*, 143, 85-90.
- Vipperman Jr. P.E., Peo Jr. E.R., Cunningham P.J. 1974. Effect of dietary calcium and phosphorus level upon calcium, phosphorus and nitrogen balance in swine. *J. Anim. Sci.*, 38, 758-765.
- Wilkinson S.J., Selle P.H., Bedford M.R., Cowieson A.J. 2013. Separate feeding of calcium improves performance and ileal nutrient digestibility in broiler chicks. *Anim. Prod. Sci.*, 54, 172-178.
- Ytrehus B., Grindflek E., Treige J., Stubsoen E., Grondalen T., Carlson C.S., Ekman S. 2004. The effect of parentage on the prevalence, severity and location of lesions of osteochondrosis in swine. *J. Vet. Med.*, 51, 188-195.

Conclusion et perspectives

L'estimation la plus précise possible des besoins des animaux est un enjeu majeur en productions animales et les minéraux tels le P et le Ca n'en font pas exception. Plusieurs critères de réponses servent à évaluer le besoin, par exemple la maximisation de la minéralisation osseuse, l'optimisation des performances de croissance ou la minimisation des rejets de P. Par conséquent, déterminer les besoins sur la base d'un seul critère est compliqué, le P et le Ca influençant différemment chacun de ces critères. Il est d'autant plus ardu de faire une estimation précise des besoins lorsque l'on doit tenir compte de la grande variabilité qui existe entre les animaux et de leurs besoins qui varient dans le temps. L'objectif principal de la présente étude était donc d'évaluer l'effet de différents apports phosphocalciques sur ces différents critères de performance ainsi que sur l'ostéochondrose chez les porcs en croissance durant 3 phases de 28 jours chacune (25-50, 50-90 et 90-120 kg). Cette expérience constitue une première étape vers l'alimentation de précision en P et en Ca.

Les résultats de la première phase, où le rapport Ca :P digestible était fixe à 2,7 montrent que les valeurs de P actuellement recommandées permettent de maximiser les performances de croissance, alors que la minéralisation osseuse évolue de façon linéaire avec l'augmentation des apports de P et de Ca. L'excrétion de P était par contre augmentée avec l'augmentation des apports en P et en Ca. Ceci possiblement en raison d'un manque de Ca pour déposer le P ou d'un apport plus élevé que les besoins pour les tissus non osseux. Les phases 2 et 3 ont pour leur part permis d'étudier l'effet de déséquilibres phosphocalciques, soit des rapports Ca :P digestible très variables (entre 1,2 et 5,5) peu présents dans la littérature. Les résultats montrent, tel qu'attendu, que des déséquilibres phosphocalciques ne sont pas souhaitables et ils confirment la relation complexe qui existe entre le P et le Ca. Ces données seront très utiles à la calibration du modèle du devenir de P et de Ca en développement pour l'alimentation de précision. L'ajout d'un aliment témoin apportant des quantités des deux minéraux largement au-dessus des besoins, tel qu'effectué sur le terrain chez les truies de remplacement, indique de plus qu'il est possible d'augmenter la minéralisation osseuse au-delà de l'aliment apportant 100 % des besoins, et ce, sans que le

P soit rejeté possiblement en raison d'un meilleur équilibre phosphocalcique, soit un rapport Ca :P digestible aux alentours de 2,9 (C+).

En ce qui concerne l'ostéochondrose, tel qu'attendu, les apports phosphocalciques n'ont pas eu d'influence sur sa fréquence. Il en va de même pour les performances de croissance qui n'étaient pas liées à la présence d'ostéochondrose. De plus, bien que des minéralisations osseuses très différentes aient été générées et que des fréquences de 35 % et 13 % d'OC aient été observées pour les cotes légères et sévères d'ostéochondrose respectivement, aucun problème de démarche n'a été détecté sur les porcs à leur sortie du camion de transport à l'abattoir. Ceci semble indiquer que l'ostéochondrose est difficilement détectable sur l'animal vivant par des mesures de démarche. Par conséquent, les résultats de la présente étude confirment qu'il n'y a pas de lien entre les apports phosphocalciques durant la phase de croissance et l'incidence d'ostéochondrose. Davantage de recherches sont nécessaires pour comprendre les causes et maîtriser cette problématique importante dans les troupeaux porcins.

La croissance linéaire de la minéralisation osseuse avec l'augmentation des apports phosphocalciques ainsi que l'absence de problèmes de boiterie ou de fractures soulèvent plusieurs questions. En effet, il est ainsi difficile de déterminer le niveau de minéralisation osseuse à viser pour estimer des apports phosphocalciques recommandés chez le porc en croissance et la truie de remplacement. Ceci sera d'autant plus un défi pour l'alimentation de précision où on alimente un seul porc et considérant la variabilité de 15 % obtenu intra traitement alimentaire sur la variable contenu minéral osseux déjà corrigée pour le poids vif de l'animal. De plus, les différents résultats obtenus dans cette expérience selon le rapport utilisé (ex. 2,7 vs 2,9) montrent qu'il est difficile de statuer sur le rapport Ca :P et les apports de P permettant de répondre aux attentes diverses de l'industrie. Ainsi selon moi, la suite à donner à ce travail serait de poursuivre la phase 1 sur les phases 2 et 3 en réalisant un essai avec un dispositif en factoriel complet, soit incluant plusieurs teneurs en P et en Ca afin de déterminer précisément les apports phosphocalciques à utiliser en fonction du critère de production visé. Néanmoins, les résultats de ce travail ainsi que ceux lui faisant suite sont des données essentielles qui seront intégrées dans le modèle métabolique du

devenir de P et du Ca chez le porc, lequel sera utilisé pour alimenter les porcs dans le cadre de l'alimentation de précision. Les résultats de la présente étude confirment de plus qu'une méthode multicritère est nécessaire pour le P et le Ca afin de répondre aux différents objectifs de production de l'industrie porcine.

Rapport-Gratuit.com

ANNEXES

Annexe 1. Résumé de l'essai préliminaire présenté au congrès 2015 du 13th Digestive Physiology of Pigs, Kliczków, Pologne (p. 41)

Growth performance, bone mineralization and P excretion in pigs fed according to different recommended levels of dietary P and Ca. J. Langlois^{1,2}, M.P. Létourneau-Montminy¹, and C. Pomar², ¹Animal Science Department, Laval University, Quebec, Canada; ²Agriculture and Agri-Food Canada, Sherbrooke, Canada.

Dietary P and Ca requirements in growing finishing pigs vary between published sources (e.g. NRC vs INRA). Twenty-four pigs (17.9±2.3 kg) were assigned to a 2x2 factorial 28-days growth trial with main factors being dietary phosphorus (NRCP=0.27 and INRAP=0.32%) and calcium (NRCCa and INRACa; total Ca:digestible P: 2.15 and 2.9, respectively) levels which corresponded respectively to NRC and INRA recommendations. Faeces and urine were collected in metabolic crates during the last week, and bone mineral concentration (BMC/BW, g/kg) was obtained the last day of the trial with dual-energy X-ray absorptiometry. Average daily gain and average daily feed intake were not affected by treatments (838g/d and 1.82 kg/d respectively; Table 2.1). Pigs receiving NRCCa feeds had lower BMC/BW (18.4 vs 19.5 g/kg; P=0.02) than INRACa pigs. Hyperphosphaturia was observed in pigs receiving NRCCa-NRCP (1.6 g/d) and INRACa-INRAP (1.5 g/d) diets (Interaction Ca×P, P=0.01) in comparison to NRCCa-INRAP (1.0 g/d) and INRACa-NRCP (0.31 g/day) fed pigs. These results indicate that dietary Ca limited bone mineralization in pigs receiving NRCCa-NRCP diet and that P in excess in INRACa-INRAP fed pigs was confirmed by the concomitant high urinary losses of Ca (Ca, P=0.01; P, P=0.03). Dietary treatments did not affect fecal P excretion. In conclusion, P and Ca requirements are interdependent and affected by the criteria used for its assessment (bone mineralization, P excretion), thus asking for a multiple criteria approach for establishing Ca and P requirements in pigs.

Key words: calcium, phosphorus, requirements, pigs

Annexe 2. Affiche présentée au congrès 2015 du 13th Digestive Physiology of Pigs, Kliczków, Pologne (p. 41 et p. 49)



Growth performance, bone mineralization and P excretion in pigs fed according to different recommended levels of P and Ca.

J. Langlois^{1,2*}, M.P. Létourneau-Montminy¹, and C. Pomar²

¹Animal Science Department, Laval University, Québec, G1V0A6, QC, Canada, ²Agriculture and Agri-Food Canada, Sherbrooke, J1M1Z3, QC, Canada, *joanie.langlois.1@ulaval.ca



Introduction

Growth performance, bone mineralization and P excretion depends of dietary P and Ca. However, these requirements may vary between published sources (e.g. NRC vs INRA). An update is necessary to adjust the recommendations.

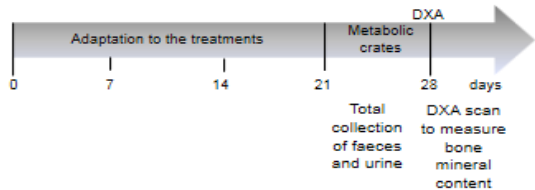
Objectives

- 1) To estimate P and Ca fecal and urinary excretion.
- 2) To evaluate the impact of feeding pigs with two different dietary recommendations in terms of growth performance, bone mineralization, and P excretion.

Materials & methods

- 24 pigs (17.9±2.0 kg), 2x2 factorial 28-days growth trial
- 4 dietary treatments, 6 pigs per treatment:

Expected (analyzed)	Ca, g/kg	Digestible P, g/kg	Ca/P
NRCCa-NRCP	5.7 (7.4)	2.7 (3.3)	2.2 (2.2)
INRACa-INRAP	9.3 (11.1)	3.2 (4.0)	2.9 (2.8)
NRCCa-INRAP	6.9 (9.1)	3.2 (4.1)	2.2 (2.2)
INRACa-NRCP	7.7 (8.7)	2.7 (3.5)	2.9 (2.5)



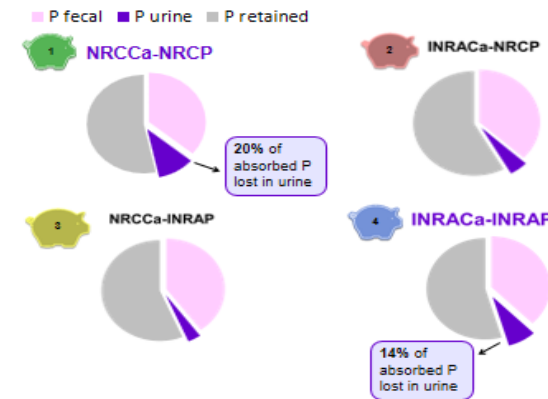
Results and discussion

1. Growth performance and bone mineralization

	NRC-Ca		INRA-Ca		P-value		
	NRC-P	INRA-P	NRC-P	INRA-P	Ca	P	Ca*P
ADG (g/d)	860	846	811	834	0.52	0.92	0.69
ADFI (g/d)	1.74	1.73	1.85	1.94	0.32	0.79	0.75
BMC/BW (g/kg)	17.8	19.1	19.5	19.5	0.02	0.12	0.14

- ADG is not affected.
- ADFI tends to be lower in NRCP than INRAP.
- Pigs receiving NRCCa had lower BMC/BW than INRACa pigs (-6%).

2. P and Ca excretion



- Hyperphosphaturia is observed in pigs receiving NRCCa-NRCP and INRACa-INRAP (1.5 g/day).
- Dietary treatments did not affect fecal P and Ca excretion.

NRC (2012) Ca and P recommendations maximized growth performance, but the low dietary Ca limits bone mineralization and induce high P excretion in urine

INRA Ca and P recommendations maximized both growth performance and bone mineralization but P was in excess and lost in urine

INRA Ca and NRC P recommendations allowed maximizing growth performance, bone mineralization while minimizing P excretion

	P-value		
	Ca	P	Ca*P
P fecal	0.47	0.10	0.79
P urine	0.94	0.55	0.01
Ca fecal	0.86	0.19	0.35
Ca urine	0.01	0.10	<0.001

Conclusion and perspectives

P and Ca requirements are interdependent and affected by the criteria used for its assessment (bone mineralization, P excretion), thus asking for a multiple criteria approach for establishing Ca and P requirements in pigs.

Annexe 3. Affiche présentée aux 48^e Journées de la Recherche Porcine (p. 41)

Agriculture and Agri-Food Canada
 Agriculture et Agroalimentaire Canada

Estimation des besoins de phosphore et de calcium chez le porc de 25 à 50 kilogrammes de poids vif.

Joanie LANGLOIS (1,2*), Candido POMAR (2), Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY(1)



(1) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, G1V0A6, QC, Canada
 (2) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, J1M1Z3, QC, Canada

*joanie.langlois.1@ulaval.ca

Introduction

Les besoins de P et Ca chez le porc en croissance varient selon le critère de performance considéré. Certaines recommandations alimentaires ont pour objectif de maximiser la minéralisation osseuse (Jondreville et Doumad, 2005) et d'autres les performances de croissance (NRC, 2012). Quel qu'il en soit, les publications à l'origine de ces recommandations datent de plusieurs années et il demeure important de réévaluer l'impact de différents apports de P chez le porc en croissance.

Objectif

Déterminer les niveaux optimaux de P alimentaire chez les porcs en croissance en termes de:

- Performance de croissance
- Minéralisation osseuse
- Excrétion de P

Matériel et méthodes

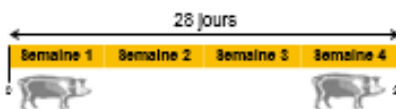
- 80 porcs Large White x Landrace, 23,8 ± 2,7 kg

Traitements alimentaires

- 5 traitements
- 15 porcs/traitement
- 60, 80, 100, 120, 140% des besoins de P digestible (Jondreville et Doumad, 2005)
- Ratio Ca total/ P digestible fixe à 2,7 (Jondreville et Doumad, 2005)

Prémélange	B					A
% besoins de P	60	80	100	120	140	
P total, g/kg	4,3	4,93	5,55	6,18	6,8	
P digestible, g/kg	1,92	2,56	3,2	3,84	4,48	
Lysine	1	1	1	1	1	
Protéine brute	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	
Ca	5,7	7,3	8,9	10,5	12,1	
Ca/P total	1,33	1,48	1,60	1,70	1,78	
Ca/P digestible	2,97	2,85	2,78	2,73	2,70	

Manipulations



Contenu minéral osseux
Gain moyen quotidien
Consommation moyenne journalière

Résultats et discussion

Paramètres	Niveaux de phosphore par rapport au besoin, %								
	60	80	100	120	140	SEM	Lin ¹	Quad	Cub
GMQ, kg/j	0,946	0,961	1,03	1,007	1,02	0,031	0,005	0,282	0,836
CMJ, g	1850	1847	1927	1921	1961	74,1	0,042	0,840	0,927
IC	1,97	1,92	1,87	1,91	1,94	0,06	0,594	0,115	0,972
CMO final, g	620	824	909	949	1047	42,3	<0,001	0,026	0,067
P retenu, g/j	3,39	4,70	5,24	5,44	6,08	0,212	<0,001	0,005	0,0145
P excrété, g/j	4,79	3,80	4,68	5,69	7,72	0,422	<0,001	<0,001	0,3723
Ca excrété, g/j	7,72	6,86	9,29	11,8	16,3	0,736	<0,001	<0,001	0,4119
Ca retenu, g/j	3,12	5,73	6,62	7,12	8,31	0,325	<0,001	0,001	0,0019

¹ Les effets linéaire, quadratique et cubique ont été évalués par contraste orthogonal (Proc MIXED, SAS)

Le GMQ et la CMJ ont augmenté de façon linéaire de 60 à 140% alors que l'IC n'a pas été modifié.

→ Une carence en P est reconnue pour induire une diminution de la CMJ qui peut se traduire en termes de GMQ (Butte, 2010), d'où la CMJ et le GMQ plus faibles pour les porcs ayant reçus des quantités de P inférieures à leurs besoins.

Le CMO a augmenté de façon linéaire de 60 à 100 %, un plateau a ensuite été observé de 100 à 120% et une seconde augmentation a été notée de 120 à 140%.

→ Les besoins en P et Ca pour maximiser la minéralisation osseuse ne semblent pas avoir été atteints.

L'excrétion de P et de Ca a été minimisée avec le traitement 80%, alors qu'elle augmentait ensuite linéairement pour les traitements 60, 100, 120 et 140% des besoins en P.

→ La plus faible excrétion à 80% des besoins de P provient probablement d'une meilleure absorption intestinale et rétention corporelle en raison des adaptations connues de l'animal aux faibles apports phosphocalciques (Butte, 2010), effet absent à 60% probablement en raison d'un manque de P disponible pour l'absorption.

Conclusion

Des quantités croissantes de P et Ca alimentaires avantagent la minéralisation osseuse et la rétention corporelle de P et Ca, mais elles augmentent leur excrétion dans l'environnement. Une approche multicritères est nécessaire pour établir les besoins en P et Ca chez le porc en croissance afin de répondre aux différents objectifs de production de l'industrie.

Références

- Jondreville C., Doumad J.Y. 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- 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, 2914-2924.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine 11th edition. National Academy Press, Washington, DC.
- Pomar C., Hauchild L., Zhang G.H., Pomar J., Lovatto P.A. 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pigs operations. Res. J. Anim. Sci., 39, 225-237.
- Butte N.R. 2010. The mineral nutrition of livestock. 4th ed. CAB Publishing, Wallingford, UK.

Estimation des besoins de phosphore et calcium chez le porc de 25 à 50 kilogrammes de poids vif.

Joanie LANGLOIS (1,2), Candida POMAR (2), Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY (1)

(1) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, G1V 0A6 Canada

(2) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, QC, J1M 1Z3 Canada

Marie-Pierre.Letourneau@fsaa.ulaval.ca

Determination of phosphorus and calcium requirements in 25 to 50 kilogram body weight pigs

An experiment was conducted to study the effect of different dietary phosphorus (P) (60-80-100-120-140% of P requirements, with equal calcium: P ratio) in terms of bone mineralization, whole-body P and calcium (Ca) retention and growth performance in growing pigs. Eighty pigs (23.8 ± 2.7 kg) received one of the five dietary treatments for a period of 28 days. Average daily feed intake (ADFI) was recorded and eight pigs per treatment were weighed and scanned with Dual energy X-ray absorptiometry at the beginning and at the end of the experiment. The ADFI ($P = 0.04$) and average daily gain (ADG, $P < 0.01$) of pigs increased linearly (60 vs 140%, +8% ADG) and bone mineral content increased significantly (Lin : $P < 0.001$, Qua : $P = 0.03$, Cub : $P = 0.07$) with the increase of dietary P and Ca. Whole-body retention of P was minimized with the diet containing 60% of P, but it was not maximized with the diet containing the higher level of P (Lin : $P < 0.001$, Qua : $P = 0.005$, Cub : $P = 0.01$). These results confirm higher Ca and P requirements for maximal bone mineralization compared to growth performance.

INTRODUCTION

Les besoins de P et Ca chez le porc en croissance varient selon le critère de performance considéré. Ainsi, certaines recommandations alimentaires ont pour objectif de maximiser la minéralisation osseuse (Jondreville et Dourmad, 2005) et d'autres les performances de croissance (NRC, 2012). Quoi qu'il en soit, les publications à l'origine de ces recommandations datent de plusieurs années. L'objectif de cette étude est de réévaluer l'impact de différents apports de P chez le porc en début de croissance.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Essai préliminaire

Les niveaux de P et de Ca de l'aliment témoin ont été déterminés dans l'essai préliminaire. Vingt-quatre porcelets logés individuellement (Large White x Landrace, 17,9 ± 2,0 kg) ont été attribués à un des quatre traitements alimentaires durant 28 jours. Les aliments ont été formulés suivant un dispositif factoriel 2 x 2 où le Ca (NRCCa et INRACa : 2,15 et 2,9 g Ca/P dig) et le P digestible (NRCP et INRAP : 2,7 et 3,2 g/kg) étaient les facteurs principaux. Les niveaux utilisés correspondaient respectivement aux recommandations du NRC (2012) et de Jondreville et Dourmad (2005). Après 21 jours, une collecte totale des urines et des fèces de 3 jours a été réalisée. Ensuite, les porcs ont été pesés et soumis à des mesures d'absorption biphotonique à rayons X (DXA ; Prodigy, GE Healthcare, Madison, WI) pour estimer le contenu minéral osseux (CMO), et le P et Ca corporels (Létourneau-Montminy et al., 2015). Des analyses de variance ont été effectuées sur les variables étudiées avec les effets fixes de P, Ca et leur interaction (proc MIXED, SAS 9.4, SAS Inst. Inc. Cary, NC).

1.2. Essai principal

1.2.1. Aliments expérimentaux

Un aliment A apportant 140% du besoin de P digestible estimé (4,3 g/kg) et un aliment B apportant 60% (1,9 g/kg) ont été mélangés pour obtenir 60, 80, 100, 120 ou 140% des besoins de P avec un ratio Ca : P digestible de 2,7. Le P a été analysé par colorimétrie et le Ca par spectrométrie au plasma.

1.2.2. Dispositif expérimental et mesures

Quatre-vingt porcs mâles (Large White x Landrace, 23,8 ± 2,7 kg) ont reçu pendant 28 jours un des cinq traitements expérimentaux servis à l'aide de nourrisseurs automatiques mesurant également quotidiennement l'ingestion (Pomar et al., 2009). Au début et à la fin de l'expérience, les porcs ont été pesés, et huit porcs par traitement ont été radiographiés par DXA. Une analyse de variance a été réalisée et les effets linéaire, quadratique et cubique de l'apport en P ont été évalués par contrastes orthogonaux (proc MIXED, SAS).

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Essai préliminaire

Les performances de croissance n'étaient pas modifiées par les traitements alimentaires. Le CMO par kg de poids vif était plus bas chez les porcs ayant reçu NRCCa (-6% ; Ca, $P = 0,02$) comparativement à INRACa. Le P excrété dans l'urine différait entre les traitements (Ca x P, $P = 0,003$, Tableau 1) ; les porcs recevant le traitement INRACa-NRCP ont excrété moins de P dans l'urine, ceux recevant NRCCa-NRCP et INRACa-INRAP en excrétant le plus. Ces résultats montrent que le faible niveau de Ca de l'aliment NRCCa-NRCP a limité le dépôt de P et que le P a été légèrement en excès chez les porcs recevant INRAP. Les

faibles pertes urinaires de P chez les INRACa-NRCP indiquent un dépôt efficace de minéraux dans l'os. Les porcs recevant l'aliment INRACa-INRAP ont été ceux qui ingéraient, absorbaient et retenaient le plus de Ca (Ca x P, $P < 0,05$), mais en rejetaient également le plus (Ca, $P = 0,01$), indiquant que le

Ca a été apporté au-delà des besoins pour la minéralisation osseuse. L'aliment 100% de l'expérience principale s'est donc basé sur la minéralisation osseuse avec le niveau de P de l'INRA et un ratio Ca:P digestible du NRC compte tenu des pertes urinaires importantes avec l'aliment INRACa-INRAP.

Tableau 1 – Utilisation du phosphore (P) et du calcium (Ca) selon les niveaux NRC ou INRA de P et Ca apportés (essai préliminaire)¹

Paramètres	NRCCa		INRACa		Statistiques ²			
	NRCP	INRAP	NRCP	INRAP	s.e.m.	Ca	P	Ca x P
Contenu minéral osseux / poids vif, g/kg	17,8	19,1	19,5	19,5	0,60	0,02	0,12	0,14
P ingéré, g/	13,7	16,0	14,6	17,4	0,74	0,16	0,003	0,73
P urine, g/	1,62	1,05	0,51	1,47	0,253	0,10	0,25	0,003
P absorbé, g/	8,19	9,73	8,56	10,26	0,469	0,35	0,003	0,86
P retenu, g/	6,57	8,68	8,24	8,78	0,490	0,05	0,01	0,08
Ca ingéré, g/	14,6	17,4	18,2	24,7	1,01	< 0,001	< 0,001	0,05
Ca urine, g/	0,18	0,52	0,58	0,91	0,144	0,01	0,03	0,95
Ca absorbé, g/	10,2	11,8	12,0	15,5	1,13	< 0,001	< 0,001	0,04
Ca retenu, g/	10,0	11,1	11,4	14,6	1,13	< 0,001	< 0,001	0,03

¹ Voir le texte pour les niveaux de P et Ca utilisés. ² Analyse de variance avec les effets P, Ca et l'interaction Ca x P; s.e.m.: erreur type de la moyenne

Tableau 2 – Performances et composition corporelle selon le niveau de phosphore (essai principal)

Paramètres	Niveaux de phosphore par rapport au besoin, %					Statistiques ¹			
	60	80	100	120	140	s.e.m.	Lin	Quad	Cub
Gain moyen quotidien, kg/	0,946	0,961	1,05	1,007	1,02	0,031	0,005	0,28	0,84
Consommation moyenne journalière, g	1850	1847	1927	1921	1981	74,1	0,04	0,84	0,93
Contenu minéral osseux final, g	620	824	909	949	1047	42,3	< 0,001	0,03	0,067
P retenu, g/	3,39	4,70	5,24	5,44	6,08	0,212	< 0,001	0,005	0,015
P excrété, g/	4,79	3,80	4,68	5,69	7,72	0,422	< 0,001	< 0,001	0,37
Ca retenu, g/	3,12	5,73	6,62	7,12	8,31	0,325	< 0,001	0,001	0,002
Ca excrété, g/	7,72	6,88	9,29	11,8	16,3	0,74	< 0,001	< 0,001	0,41

¹ Analyse de variance avec les effets linéaire (Lin), quadratique (Quad) et cubique (Cub) de l'apport en P; s.e.m.: erreur type de la moyenne

2.2. Essai principal

Le gain moyen quotidien (GMQ) (Lin : $P = 0,005$; Tableau 2) et la CMU (Lin : $P = 0,04$) ont augmenté de façon linéaire de 60 à 140% mais l'IC n'a pas été modifié. Une carence en P est en effet reconnue pour induire une diminution de consommation qui peut se traduire en termes de GMQ (Suttle, 2010). Même si l'effet est linéaire, il est important de noter qu'on observe peu de différence entre les traitements, et des variations intra traitement importantes (8-12%). Le CMQ a augmenté de façon linéaire de 60 à 100 %, un plateau a ensuite été observé de 100 à 120%, suivi d'une seconde augmentation de 120 à 140% (15%) (Lin : $P < 0,001$; Qua : $P = 0,03$; Cub : $P = 0,07$). Les besoins en P et Ca ne semblent donc pas avoir été atteints pour maximiser la minéralisation osseuse. L'excrétion de P était plus faible chez les porcs consommant le traitement 80% que chez ceux recevant les traitements 60 et 100%, alors qu'elle augmentait linéairement pour les traitements 100 à

140% (Lin : $P < 0,001$; Qua : $P < 0,001$). La plus faible excrétion pour le traitement 80% provient probablement de meilleures absorptions intestinales et rétention corporelle en raison des adaptations connues de l'animal aux faibles apports phosphocalciques (Suttle, 2010) et d'une limitation du P disponible pour l'absorption avec le traitement 60%. L'évolution cubique de la rétention de P et Ca et la tendance pour le CMQ, en raison d'une ré-augmentation à 140%, pourraient provenir d'un meilleur équilibre au niveau du Ca et du P absorbés.

CONCLUSION

Des quantités croissantes de P et Ca alimentaires avantagent la minéralisation osseuse et la rétention corporelle de P et Ca, mais elles augmentent leur excrétion dans l'environnement. Une approche multicritère est donc nécessaire pour établir les besoins en P et Ca chez le porc en croissance.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Jondreville C., Doumad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- Létourneau-Montminy M.P., Lovatto P.A., 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.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine 11th edition. National Academy Press, Washington, DC, 400 p.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.H., Pomar J., Lovatto P.A., 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pigs operations. Braz. J. Anim. Sci., 38, 226-237.
- Suttle N.F., 2010. The mineral nutrition of livestock. 4th ed. CABI Publishing, Wallingford, UK, 587 p.

Impact de déséquilibres phosphocalciques sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition

Joanie LANGLOIS (1,2), Candido POMAR (2), Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY (1)

(1) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, G1V 0A6 Canada

(2) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, QC, J1M 1Z3 Canada

Marie-Pierre.Letourneau@fsaa.ulaval.ca

Impact de déséquilibres phosphocalciques sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition

Les effets de différents apports de phosphore (P) (60, 80, 100, 120 et 140% des besoins de P, et un témoin terrain C+) et un apport déséquilibré de calcium (Ca) (130, 115, 100, 85, 70% des besoins de Ca et C+) ont été étudiés simultanément en termes de minéralisation osseuse, de rétention corporelle de P et Ca et de performances de croissance chez le porc pendant deux phases d'alimentation de 28 jours chacune. Un aliment A apportant 140% des besoins en P digestible et un aliment B apportant 60% de ces mêmes besoins ont été utilisés en mélange pour chaque phase. Le Ca total:P digestible était près de 1,3 et 5,5 pour les aliments A et B des deux phases et de 3,0 et 2,5 dans le C+ pour les phases 2 et 3 respectivement. Quarante-trois porcs (51,6 ± 4,6 kg) ont reçu un des six traitements alimentaires. Durant les deux phases à l'étude, la consommation était diminuée chez les porcs recevant les niveaux de P et Ca de 60 et 130% et C+ comparativement aux porcs des autres traitements ($P < 0,001$). Le contenu minéral osseux était aussi réduit avec les porcs recevant 60 et 130% de P et Ca respectivement, et maximisé dans le traitement C+ ($P < 0,001$), qui était le seul à apporter des niveaux élevés de P et Ca. Le manque de Ca pour l'os des porcs recevant 100, 120 et 140% de P digestible était confirmé par une excrétion de P qui augmentait proportionnellement de 60 à 140% de l'apport de P digestible ($P < 0,001$). Ces résultats apportent des éléments de compréhension essentiels au développement d'une méthode multicritère de recommandations phosphocalciques chez le porc qui tiendra compte des objectifs de production.

Impact of phosphate and calcium imbalances on growth performance and bone mineralization in finishing pigs

The effects of different dietary phosphorus (P) (60-80-100-120-140% of P requirements, and a commercial control C+) with dietary calcium (Ca) imbalances (130, 115, 100, 85, 70% of Ca requirements and C+) were studied simultaneously in terms of bone mineralization, P and Ca body retention and growth performance in pigs during two feeding-phases of 28 days each. Feeds A and B contained 140 and 60% respectively of the estimated digestible P requirements and were blended for each feeding phase. Total Ca: digestible P ratios were near 1.3 and 5.5 for feeds A and B of both phases and 3.0 and 2.5 for C+ for phases 2 and 3, respectively. Ninety-three pigs (51.6 ± 4.6 kg) received one of the six dietary treatments. Average daily feed intake decreased for pigs receiving levels of P and Ca of 60 and 130% and C+ in comparison with the other treatments ($P < 0.001$). Bone mineral content was also reduced with pigs receiving 60 and 130% of P and Ca respectively, while it was maximized in C+ pigs ($P < 0.001$), the former being the only ones with high levels of P and Ca. The Ca deficiency in pigs receiving 100, 120 and 140% of digestible P were confirmed by the proportional increase of P excretion in pigs receiving from 60 to 140% of digestible P ($P < 0.001$). These results bring elements of understanding which are essential for the development of a multi-criteria method of estimating P and Ca allowances according to the expected production objective.

INTRODUCTION

Le coût d'alimentation peut représenter jusqu'à 60% des coûts de production d'un porc charcutier. Bien que les méthodes d'estimation de la valeur nutritionnelle des aliments se soient grandement améliorées, une variabilité demeure quant aux valeurs attendues dans les aliments complets. Ceci entraîne l'utilisation de marges de sécurité parfois considérables, pour éviter des diminutions des performances de croissance, lesquelles augmentent les coûts d'alimentation. De plus, pour certains nutriments tels le phosphore (P), ces apports en excès ont des conséquences parfois graves pour l'environnement. L'alimentation de précision est une option très intéressante pour réduire les coûts d'alimentation et les rejets de nutriments en permettant d'alimenter quotidiennement chaque porc du troupeau avec la quantité de nutriments dont il a besoin (Pomar et al., 2009). Cependant, pour une application efficace de cette nouvelle méthode d'alimentation, le besoin en P doit être précisément établi. Ceci est complexe compte tenu des multiples critères pouvant servir à définir le besoin (performance, os, excrétion), en plus des nombreux facteurs de variation de son utilisation (Létourneau-Montminy et al., 2014). Ainsi, des études sont nécessaires pour mieux comprendre le devenir du P alimentaire, mais également les facteurs modulant son utilisation par les porcs, notamment le calcium (Ca). Différents déséquilibres phosphocalciques ont été créés afin de faire ressortir les effets propres au P et au Ca et leurs interactions en termes de performances de croissance, de minéralisation osseuse et de rejets de P chez le porc en finition.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et dispositif expérimental

Quatre-vingt-seize porcs de 54 jours d'âge ($23,8 \pm 2,7$ kg) ont reçu pendant trois phases de 28 jours chacune un parmi six traitements expérimentaux à l'aide de nourrisseurs automatiques (Pomar et al., 2009). Les quantités ingérées quotidiennes ont été mesurées individuellement à l'aide des automates. Au début de chacune des phases de croissance et à la fin de l'expérience, huit porcs par traitement, choisis au début de l'expérience et de façon aléatoire ont été pesés, anesthésiés et le corps entier a été scanné par absorptiométrie aux rayons X à double intensité (DXA) (DPX-L, Lunar Corp., Madison, WI) pour estimer le contenu minéral osseux (CMO) et la masse maigre et grasse, lesquels ont été utilisés pour estimer le P, le Ca, les protéines et les lipides corporels selon des équations préétablies (Pomar et Rivest, 1996 ; Létourneau-Montminy et al., 2014). Des échantillons sanguins ont également été prélevés avant les scans dans des tubes Vacutainer contenant 100 USP d'héparine de sodium, stockés sur la glace puis centrifugés.

1.2. Aliments expérimentaux

Pour la première phase de croissance, deux régimes granulés à base de maïs et de tourteau de soja ont été utilisés, soit un aliment A apportant 140% du besoin de P digestible et de Ca (besoin estimé d'après Jondreville et Dourmad, 2005) et un aliment B en apportant 60%. Les aliments A et B ont été mélangés pour en arriver à cinq traitements alimentaires déterminant 60, 80, 100, 120 ou 140% des besoins de P, et un témoin « terrain » C+, avec un Ca apporté à un ratio fixe de 2,7 fois le P digestible (Tableau 1).

Tableau 1 – Aliments expérimentaux¹

Item	Phase 1			Phase 2			Phase 3		
	A	B	C+	A	B	C+	A	B	C+
Ingrédients, % matière fraîche									
Maïs	52,6	57,3	54,6	62,5	61,8	60,3	67,9	66,5	65,3
Tourteau de soja	24,7	24,1	24,4	18,8	18,9	19,1	14,6	14,8	15,0
Blé	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Phosphate monocalcique	1,69	0,39	1,19	1,18	0,18	0,93	0,91	0,11	0,96
Graisses d'origine animale	2,30	0,80	1,70	0,70	0,90	1,40		0,50	0,70
Sel	0,50	0,50	0,50	0,51	0,51	0,50	0,51	0,51	0,51
Sulfate de lysine	0,5	0,52	0,51	0,49	0,49	0,49	0,4	0,4	0,39
Pierre à chaux	2,3	0,88	1,59	0,3	1,72	1,74	0,29	1,82	1,8
L-Thréonine	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,08
Méthionine	0,1	0,09	0,1	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07
L-thryptophane							0,01	0,01	0,01
Prémix vitamines et minéraux	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,20	0,20	0,20
Composition chimique, % ²									
Protéine brute	18,6	18,2	18,9	15,6	14,4	15,5	14,2	14,0	13,6
Lysine digestible (liéale apparente)	1,04	1,04	1,04	0,90	0,90	0,90	0,75	0,75	0,75
Calcium (Ca)	1,21	0,57	0,91	0,41	0,78	0,85	0,37	0,66	0,72
Phosphore (P) total	0,68	0,43	0,56	0,54	0,37	0,49	0,52	0,32	0,42
P digestible	4,50	1,90	3,50	3,36	1,44	2,90	2,80	1,20	2,90
Ca: P digestible	2,70	2,97	2,60	1,22	5,42	2,93	1,32	5,50	2,48

¹A : aliment à 140% du besoin en P et Ca ; B : aliment à 60% du besoin en P et Ca ; C+ : aliment correspondant aux niveaux utilisés sur le terrain

²Valeurs analysées sauf pour le P digestible et la lysine qui sont calculés à partir de Souvart et al.,(2004)

Pour les phases 2 et 3 (P2 et P3), une inversion des quantités de Ca des aliments A et B s'est produite lors de la fabrication, occasionnant des ratios Ca:P digestible de 1,3 et 3,3 pour les aliments A et B, respectivement (Tableau 1). Le ratio Ca:P digestible diminuait de ce fait avec l'augmentation de P alors que le C+ présentait des niveaux élevés de P et Ca durant les trois phases de croissance tel qu'attendu. Ainsi, dans les aliments complets et selon les valeurs analysées, le P varie de 60 à 140% du besoin conjointement à des variations de Ca de 130 à 70% alors que le C+ apporte de l'ordre de 140% des besoins pour les deux minéraux. Les traitements alimentaires correspondants sont identifiés dans ce document par 60-130, 80-115, 100-100, 120-85, 140-70 et C+(ou 120-140 pour P2 et 145-140 pour P3). Leurs ratios respectifs de Ca total:P digestible sont de 3,42, 3,38, 2,48, 1,74, 1,22 et 2,93 pour la P2 et de 3,30, 3,67, 2,38, 1,84, 1,32 et 2,48 pour la P3.

1.3. Analyses de laboratoire

Les aliments et les échantillons de plasma ont été analysés pour connaître leur teneur en matières azotées totales, P (colorimétrie) et Ca (spectrométrie au plasma).

1.4. Analyses statistiques

Une analyse de variance a été réalisée par phase avec le traitement comme effet principal et l'animal comme unité expérimentale, et les moyennes des traitements ont été évaluées avec des comparaisons multiples au moyen de la procédure MIXED de SAS (SAS 9.4, 2002, Inst. Inc. Cary, NC) en utilisant le test de Tukey. Les différences sont considérées comme significatives lorsque $P < 0,05$, et une valeur de $P \leq 0,10$ dénote une tendance statistique.

2. RÉSULTATS

Les résultats concernant la première phase d'alimentation sont présentés dans une autre communication (Langlois et al., 2016).

2.1. Phase 2

Les poids initiaux n'étaient pas différents entre les traitements alors que les poids finaux différaient jusqu'à 6% par rapport à la moyenne ($P < 0,05$; Tableau 2). Ainsi, les porcs ayant reçu le traitement 60-130 étaient les moins lourds et les ceux ayant reçu le traitement 80-115 avaient un poids intermédiaire ($P = 0,02$). Le gain moyen quotidien (GMQ) augmentait et différait entre les traitements 60-130 à 100-100 puis atteignait un plateau ($P < 0,001$) pour des apports de P supérieurs. La consommation moyenne journalière (CMJ) augmentait et différait entre les traitements 60-130 à 100-100 puis atteignait un plateau entre les traitements 100-100 et 140-70 ($P < 0,001$). La CMJ pour le C+ était équivalente à celle des traitements 60-130 et 80-115. L'indice de conversion alimentaire (IC) était plus faible pour les traitements 140-70 et C+, comparativement aux autres traitements qui étaient similaires ($P < 0,001$).

Au début de la phase, le CMO, le P et le Ca corporels différaient entre les traitements ($P < 0,001$) avec les porcs recevant les traitements 140-70 et C+ présentant les valeurs les plus élevées. À la fin de la phase les porcs recevant les traitements 60-130 et C+ présentaient respectivement les valeurs les plus faibles et les plus élevées par rapport aux autres porcs pour ces mesures ($P < 0,001$).

Le P ingéré augmentait avec les apports de P pour les

traitements 60-130 à 140-70 et était au niveau du 100-100 pour les porcs du traitement C+ ($P < 0,001$). Le P retenu était respectivement le plus faible et le plus élevé ($P < 0,001$) pour les traitements 60-130 et C+, soit une différence de 41%. L'excrétion de P augmentait des traitements 60-130 à 140-70 et l'excrétion des porcs recevant le traitement C+ était équivalente à celles pour les traitements 80-115 et 100-100 ($P < 0,001$). Les porcs recevant le traitement C+ étaient ceux qui consommaient le plus de Ca ($P < 0,001$) alors que les valeurs étaient similaires pour les 60-130 et 80-115 puis diminuaient par la suite. Le Ca retenu était supérieur pour les animaux du traitement C+, comparé aux traitements 80-115, 100-100 et 120-85 qui retenaient autant le Ca, suivis des traitements 140-70 et 60-130 ($P < 0,001$). L'excrétion de Ca était la plus élevée pour les traitements 60-130 et 80-115, les porcs du traitement C+ étant intermédiaires. Elle diminuait ensuite avec la diminution du Ca de 100-100 à 140-70 ($P < 0,001$). Le P plasmatique était le plus faible chez les porcs du traitement 60-130 comparativement aux autres traitements qui présentaient des valeurs similaires ($P < 0,001$). Le Ca plasmatique diminuait de façon linéaire entre les traitements 60-130 à 100-100 et atteignait un plateau ensuite ($P < 0,001$).

2.2. Phase 3

À la fin de la phase 3, les poids des porcs étaient différents entre les traitements ($P < 0,001$); les porcs du traitement 60-130 ayant un poids inférieur aux autres, ceux du traitement 80-115 ayant un poids intermédiaire, et ceux des traitements 100-100 à C+ ayant un poids similaire. Le GMQ augmentait entre les traitements 60-130 à 100-100 et atteignait un plateau ensuite ($P < 0,001$). La CMJ était plus basse pour les porcs du traitement 60-130 et intermédiaire pour ceux du traitement C+ ($P < 0,001$). Elle atteignait ensuite un plateau pour ceux de 80-115 à 140-70. L'IC n'était pas différent et plus faible pour les traitements 140-70 et C+, comparativement aux autres traitements qui n'étaient pas différents ($P < 0,008$).

Du début à la fin de la phase 3, le CMO est demeuré inférieur pour les animaux du traitement 60-130 et supérieur pour ceux du traitement C+ ($P < 0,001$). Il a aussi augmenté linéairement du traitement 60-130 au traitement 100-100 pour ensuite atteindre un plateau jusqu'au traitement 140-70. Le P et le Ca corporels, qui évoluaient de la même façon entre les traitements, augmentaient linéairement entre les porcs des traitements 60-130 à 100-100, pour ensuite atteindre un plateau jusqu'à ceux du traitement 140-70 ($P < 0,001$). Les porcs du traitement C+ accumulaient les quantités corporelles les plus élevées. Le P ingéré augmentait linéairement avec les apports en P ($P < 0,001$) pour les porcs des traitements 60-130 à 140-70, la valeur pour le traitement C+ étant similaire à celle pour le traitement 100-100. Le P retenu était moins élevé pour les porcs du traitement 60-130% et plus élevé pour ceux du traitement C+ ($P < 0,001$), avec une différence de 48% entre les deux. L'excrétion de P augmentait linéairement avec l'augmentation de l'apport en P ($P < 0,001$). Elle était donc moindre avec les porcs du traitement 60-130 et plus élevée pour ceux du traitement 140-70. Les porcs du traitement C+ étaient intermédiaires entre ceux du traitement 60-130 et ceux des traitements 80-115 et 100-100. Le Ca retenu était moins élevé pour les porcs du traitement 60-130, puis augmentait jusqu'au traitement 100-100 ($P < 0,001$). Les porcs du traitement 140-70 retenaient autant le Ca que ceux du traitement 80-115, et ceux du traitement 120-85

Tableau 2 – Résultats des critères mesurés en fonction des apports phosphocalciques durant les phases 2 et 3¹

P, % besoin	60	80	100	120	140	C4; P2=120; P3=145	ETR	Probabilité ²
Ca, % besoin	130	115	100	85	70	140		
Phase 2								
Poids vif initial, kg	50,8	51,5	52,7	52,2	52,5	52,8	1,7	0,815
Poids vif final, kg	82,2 ^b	85,4 ^{ab}	89,6 ^a	87,7 ^a	89,2 ^a	88,1 ^a	2,4	0,019
GMO, kg/j	1,12 ^c	1,21 ^b	1,32 ^a	1,27 ^{ab}	1,31 ^a	1,26 ^{ab}	0,04	<0,001
CMU, g/j	2722 ^d	3003 ^{bc}	3219 ^a	3190 ^{ab}	3077 ^{ab}	2842 ^{cd}	106	<0,001
IC	2,44 ^{ab}	2,49 ^a	2,45 ^{ab}	2,52 ^a	2,35 ^{bc}	2,25 ^c	0,06	<0,001
CMO initial, g	620 ^d	830 ^c	909 ^{bc}	949 ^b	1047 ^a	972 ^{ab}	42	<0,001
P initial, g	200 ^d	240 ^c	257 ^{bc}	263 ^b	282 ^a	271 ^{ab}	10	<0,001
Ca initial, g	227 ^d	309 ^c	331 ^{bc}	346 ^b	381 ^a	354 ^{ab}	15	<0,001
Protéine corporelle initiale, kg	8,40	8,65	8,88	8,74	8,87	9,14	0,27	0,127
CMO final, g	890 ^d	1282 ^c	1415 ^{bc}	1393 ^{bc}	1425 ^b	1610 ^a	67	<0,001
P final, g	303 ^d	380 ^c	409 ^{bc}	403 ^{bc}	411 ^b	447 ^a	15	<0,001
Ca final, g	327 ^d	468 ^c	516 ^{bc}	508 ^{bc}	520 ^b	587 ^a	24	<0,001
Protéine corporelle finale, kg	13,5 ^e	14 ^{de}	14,6 ^{cd}	14,4 ^{cd}	14,5 ^{cd}	14,9 ^d	0,4	0,018
P ingéré, g/j	9,87 ^d	12,7 ^c	14,4 ^b	15,7 ^{ab}	16,9 ^a	14,3 ^b	0,7	<0,001
P retenu, g/j	3,70 ^d	4,98 ^{bc}	5,45 ^b	5,03 ^{bc}	4,60 ^c	6,31 ^a	0,25	<0,001
P excrété, g/j	6,17 ^a	6,68 ^d	9,00 ^c	10,6 ^b	12,3 ^a	8,03 ^{cd}	0,58	<0,001
Ca ingéré, g/j	20,8 ^b	21,1 ^b	18,9 ^d	15,8 ^d	12,8 ^e	24,9 ^a	0,9	<0,001
Ca retenu, g/j	3,57 ^d	5,91 ^b	6,60 ^b	5,81 ^b	4,95 ^c	8,31 ^a	0,44	<0,001
Ca excrété, g/j	17,2 ^a	15,2 ^b	12,3 ^c	10,0 ^d	7,87 ^e	16,6 ^{ab}	0,7	<0,001
Ca plasma final, mg/l	107 ^a	101 ^b	94,1 ^{cd}	94,7 ^{cd}	93,8 ^d	97,2 ^{cd}	1,8	<0,001
P plasma final, mg/l	121 ^b	134 ^a	140 ^a	138 ^a	138 ^a	141 ^a	4	<0,001
Phase 3								
Poids vif final, kg	111 ^c	117 ^b	125 ^a	122 ^{ab}	124 ^a	122 ^{ab}	3	<0,001
GMO, kg/j	1,02 ^b	1,13 ^b	1,25 ^a	1,22 ^a	1,25 ^a	1,21 ^{ab}	0,04	<0,001
CMU, g/j	3272 ^d	3592 ^{cd}	3816 ^a	3819 ^a	3699 ^{ab}	3556 ^b	132	<0,001
IC	3,21 ^a	3,19 ^a	3,05 ^{ab}	3,12 ^{ab}	2,95 ^b	2,95 ^b	0,09	0,008
CMO final, g	1271 ^d	1895 ^c	2141 ^b	2051 ^{bc}	2022 ^{bc}	2504 ^a	102	<0,001
P final, g	412 ^d	539 ^c	592 ^b	571 ^{bc}	570 ^{bc}	659 ^a	21	<0,001
Ca final, g	466 ^d	691 ^c	780 ^b	748 ^{bc}	737 ^{bc}	911 ^a	37	<0,001
Protéine corporelle finale, kg	17,1 ^c	18,3 ^b	19,1 ^a	18,6 ^{ab}	18,9 ^{ab}	19,34 ^a	0,48	<0,001
P ingéré, g/j	9,81 ^a	13,1 ^d	15,1 ^c	16,9 ^b	18,6 ^a	14,7 ^b	0,7	<0,001
P retenu, g/j	3,92 ^d	5,69 ^c	6,52 ^b	5,99 ^{bc}	5,70 ^c	7,57 ^a	0,35	<0,001
P excrété, g/j	5,89 ^d	7,41 ^c	8,58 ^b	10,9 ^b	12,9 ^a	7,16 ^{cd}	0,73	<0,001
Ca ingéré, g/j	20,2 ^b	20,8 ^b	18,5 ^d	15,9 ^d	13,2 ^e	25,2 ^a	0,8	<0,001
Ca retenu, g/j	4,97 ^d	7,97 ^c	9,43 ^b	8,55 ^{bc}	7,77 ^c	11,6 ^a	0,6	<0,001
Ca excrété, g/j	15,3 ^a	12,8 ^b	9,08 ^c	7,35 ^d	5,47 ^e	13,7 ^{ab}	0,9	<0,001
Ca plasma final, mg/l	112 ^a	98,6 ^b	92,7 ^c	93,0 ^c	92,0 ^c	92,1 ^c	2,4	<0,001
P plasma final, mg/l	115 ^a	125 ^b	134 ^a	132 ^{ab}	129 ^{ab}	129 ^{ab}	4	<0,001

¹ C4, aliment éternais ; P2 et P3, phases 2 et 3 ; GMO, gain moyen quotidien ; CMU, consommation moyenne journalière ; IC, indice de consommation ; CMO, contenu minéral osseux corporel.

² ETR : écart-type résiduel du modèle. Comparaisons multiples ; des lettres différentes sur une même ligne indiquent une différence significative ($P < 0,05$).

étaient intermédiaires entre ces deux derniers. Les porcs recevant le traitement C+ étaient ceux qui retenaient le plus de Ca. L'excrétion de Ca augmentait linéairement avec l'augmentation de l'apport en Ca, et conjointement à la diminution de l'apport en P ($P < 0,001$). Elle était donc la plus élevée avec les porcs du traitement 60-130, et la plus faible pour ceux du traitement 140-70. Les porcs du traitement C+ étaient intermédiaires entre ceux du traitement 60-130 et ceux du traitement 80-115. Le P plasmatique était encore une fois plus faible chez les animaux du traitement 60-130, suivis de ceux recevant le traitement 80-115, puis similaire entre les porcs des autres traitements ($P < 0,001$). Le Ca plasmatique diminuait du traitement 60-130 jusqu'au traitement 100-100 puis atteignait un plateau par la suite ($P < 0,001$).

3. DISCUSSION

La CMU était plus faible pour les porcs consommant les niveaux les plus élevés de Ca (60-130 et C+) et ce, indépendamment des apports de P. Au niveau digestif, le Ca peut se lier aux molécules de P, notamment avec les phosphates, et former des complexes insolubles et donc non absorbables (Heaney et Nordin, 2002). Ainsi, plus l'apport de P est faible, plus l'effet négatif du Ca aura un impact sur les quantités absorbées et utilisables par l'animal tel que montré par Reinhart et Mahan (1986). La carence en P est reconnue pour induire une baisse d'appétit chez plusieurs espèces (Suttle, 2010). Cependant, le fait qu'on observe une diminution de la consommation chez les C+ également, montre un effet propre du Ca. Avec des porcs de même poids et recevant des apports de Ca et P similaires, Eeckhout et al. (1995) ont obtenu des effets négatifs d'apports faibles de P sur la consommation indépendamment des apports de Ca. Il est cependant à noter qu'ils n'ont pas observé d'effets des traitements sur la calcémie, ce qui était le cas ici. Chez le poulet, un appétit calcique, soit une consommation plus élevée d'une source de Ca lorsque les apports de Ca sont faibles, a été montré (Lobaugh et al., 1981; Wilkinson et al., 2013). Cette régulation de la consommation de Ca serait fonction de la calcémie. Ainsi, il est possible qu'en raison de l'augmentation de calcémie induite par les aliments 60-130 et 80-115, les porcs aient réduit leur consommation. Cependant, ceci n'a pas été suffisant pour empêcher la calcémie d'augmenter. Les porcs du traitement C+ consommaient moins, mais n'avaient pas d'augmentation de calcémie. Ceci pourrait s'expliquer par un dépôt accru de Ca dans l'os, soit par exemple 8,3 g/j comparativement à 6,6 g/j de Ca retenu pour les animaux du traitement 100-100 de la P2, compte tenu d'un apport de P balancé (Tableau 2). Les modifications de calcémie confirment également que la régulation via la calcitonine, une hypocalcémiante, n'est pas efficace chez le porc (Pointillart et al., 1987).

Les effets de la CMU se traduisaient en termes de GMQ seulement lorsque l'apport de P était faible conjointement à un apport élevé de Ca, les porcs recevant le traitement C+ présentant un GMQ élevé malgré une CMU diminuée. Cela indique que c'était bien le P l'élément le plus limitant et responsable de la diminution de performances de croissance. Ceci est bien illustré par le P plasmatique qui était réduit chez les porcs des traitements 60-130 et 80-115. Il est également important de noter que les résultats de composition corporelle par DXA montrent une diminution de la protéine corporelle chez les porcs du traitement 60-130. Ceci est en accord avec le fait qu'environ 30% du P corporel se retrouve dans les tissus mous, principalement les muscles (Nielsen, 1973). Étant donné

que le GMQ n'était pas diminué chez les porcs du traitement C+ malgré une diminution de la consommation, l'IC était le plus faible chez les porcs consommant ce traitement.

Les effets de P sur les performances de croissance sont variables, certains auteurs ayant observé des effets (Cromwell et al., 1993; Ekpe et al., 2002; Létourneau-Montminy et al., 2012) et d'autres non (Hastad et al., 2004; Pomar et al., 2006) pour des niveaux de P similaires. Ceci pourrait s'expliquer par les niveaux de Ca apportés. En effet, on observe un effet plus marqué de la carence P lorsque les apports de P varient alors que celui de Ca est fixe (Cromwell et al., 1993; Ekpe et al., 2002) en raison de l'interaction digestive discutée plus tôt. Les porcs recevant les aliments 60-130 et 80-115 présentaient des CMO plus faibles que les autres, et ce, malgré des apports de Ca qui dépassaient les besoins. Ceci confirme que le déficit en P limitait le dépôt osseux du Ca et l'interdépendance de ses deux minéraux pour la minéralisation osseuse (Crenshaw, 2001). L'important besoin en P et Ca, et ce, dans un bon équilibre est également bien illustré dans les deux phases par le traitement C+ qui maximisait la minéralisation osseuse.

L'excrétion de P augmentait de façon linéaire des traitements 60-130 à 140-70, alors que le dépôt corporel plafonnait dès 100-100. Il est bien connu que les apports faibles de Ca ne permettent pas de déposer le P au niveau osseux ; le P non déposé est perdu dans les urines (Pointillart et Fontaine, 1983; Létourneau-Montminy et al., 2010). Ainsi, la diminution des apports de Ca conjointement à l'augmentation des apports de P explique une excrétion élevée de P chez les porcs 120-85 et 140-70.

D'un point de vue pratique, on note que les ratios Ca:P digestible étaient similaires dans les aliments 100-100 et C+, mais leurs résultats de performances bien distincts. En effet, les porcs recevant le traitement C+ présentaient un IC plus faible (-8% en P2), compte tenu d'une CMU diminuée, ainsi qu'une minéralisation plus élevée (+14% en P2). Ainsi, l'utilisation d'un ratio Ca:P digestible en formulation n'est valable que pour un niveau de P digestible donné. Ce résultat montre de plus que les recommandations actuelles (Jondreville et Dourmad, 2005) ne maximisent probablement pas la minéralisation osseuse.

Le traitement C+ est utilisé sur le terrain pour l'alimentation des truies de remplacement. Bien que les niveaux de P et Ca soient très élevés tout au long de la croissance, ils permettent une meilleure minéralisation osseuse et une excrétion de P comparable au traitement 100-100 compte tenu d'une meilleure rétention. Néanmoins, l'effet négatif des hauts niveaux de Ca sur la consommation est préoccupant. En effet, advenant une sous-estimation d'un autre nutriment, le GMQ pourrait être affecté. De plus, il n'est pas certain que de tels niveaux soient nécessaires chez le porc charcutier.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de la présente étude confirment la relation complexe qui existe entre le P et le Ca alimentaires. Ainsi, on observe que certains paramètres de croissance, tels que la CMU, peuvent être affectés indépendamment par l'un ou l'autre de ces minéraux majeurs, alors que pour d'autres paramètres, tels que le CMO, les effets sont interdépendants. De plus, certains niveaux vont maximiser les performances de croissance aux dépens de la minéralisation osseuse, exigeant un compromis. Quoi qu'il en soit, le maintien de l'équilibre dans les apports est important. Les résultats montrent

également que le ratio Ca:P digestible doit être réfléchi en considérant le niveau de P. La modulation de la consommation via la calcémie pose question et nécessiterait des études supplémentaires mais pourrait toutefois expliquer en partie les baisses de performances observées avec des hauts niveaux de

Ca. Néanmoins, ces résultats mettent en phase la nécessité de développer une approche multicritères permettant de moduler les apports phosphocalciques en fonction de l'objectif de production.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: A.J. Lewis & L.L. Southern (Eds), Swine nutrition second edition, 187-212. CRC Press, Florida, USA.
- Cromwell G.L., Stahlly T.S., Coffey R.D., Monegue H.J., Randolph J.H., 1993. Efficacy of phytase in improving the bioavailability of phosphorus in soybean meal and corn-soybean meal diets for pigs. *J. Anim. Sci.*, 71, 1831-1840.
- Eeckhout W., de Paepe M., Wamants N., Bekaert H., 1995. An estimation of the minimal P requirements for growing-finishing pigs, as influenced by the Ca level of the diet. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 52, 29-40.
- Elpe E.D., Zijlstra R.T., Patience J.F., 2002. Digestible phosphorus requirement of grower pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 541-549.
- Hastad C.W., Dritz S.S., Tokach M.D., Goodband R.D., Nielsen J.L., DeRouchey J.M., Boyd R.D., Johnston M.E., 2004. Phosphorus requirements of growing-finishing pigs reared in a commercial environment. *J. Anim. Sci.*, 82, 2945-2952.
- Heaney R.P., Nordin B.E.C., 2002. Calcium effects on phosphorus absorption: Implications for the prevention and co-therapy of osteoporosis. *J. Am. Coll. Nutr.*, 21, 239-244.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Langlois J., Pomar C., Létourneau-Montminy M.P., 2016. Estimation des besoins de phosphore et calcium chez les porcs de 25 à 50 kilogrammes de poids vif. *Journées Rech. Porcine*, 48, 163-164.
- Létourneau-Montminy M.P., Nancy A., Magnin M., Sauvant D., Bernier J.F., Pomar C., Jondreville C., 2010. Effect of reduced dietary calcium concentration and phytase supplementation on calcium and phosphorus utilization in weaning pigs with modified mineral status. *J. Anim. Sci.*, 88, 1706-1717.
- Létourneau-Montminy M.P., Jondreville C., Sauvant D., Nancy 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.
- Lobaugh B., Joshua G., Mueller W.J., 1981. Regulation of calcium appetite in broiler chickens. *J. Nutr.*, 111, 298-306.
- Nielsen A.J., 1973 Anatomical and Chemical Composition of Danish Landrace Pigs Slaughtered at 90 Kilograms Live Weight in Relation to Litter, Sex and Feed Composition. *J. Anim. Sci.*, 36, 476-483.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine 11th edition. National Academy Press, Washington, DC, 400 p.
- Pointillart A., Fontaine N., 1983. Effet de deux régimes hypocalcémiques sur la rétention et l'absorption de phosphore et du calcium chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 15, 375-384.
- 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.
- Pomar C., Rivest J., 1996. The effect of body position and data analysis on the estimation of body composition of pigs by dual energy x-ray absorptiometry (DEXA). Proceedings of the 46th Annual conference of the Canadian Society of Animal Science (Abstr.), pp. 26.
- Pomar C., Jondreville C., Dourmad J.-Y., Bernier J. 2006. Influence du niveau de phosphore des aliments sur les performances zootechniques et la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer et zinc chez le porc de 20 à 100 kg de poids vif. *Journées Rech. Porcine*, 38, 209-216.
- Pomar C., Hauschild L., Zhang G.H., Pomar J., Lovatto P.A., 2009. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pigs operations. *Braz. J. Anim. Sci.*, 38, 226-237.
- Reinhart G.A., Mahan D.C., 1986. Effect of various calcium:phosphorus ratios at low and high dietary phosphorus for starter, grower and finishing swine. *J. Anim. Sci.*, 63, 457-466.
- Sauvant D., Perez M., Tran G., 2004. Tables of composition and nutritional value of feed materials. INRA, Association Française de Zootechnie, Paris, 304 p.
- Suttle N.F., 2010. The mineral nutrition of livestock. 4th ed. CABI Publishing, Wallingford, UK, 587 p.
- Wilkinson S.J., Selle P.H., Bedford M.R., Cowleson A.J., 2013. Separate feeding of calcium improves performance and ileal nutrient digestibility in broiler chicks. *Anim. Prod. Sci.*, 54, 172-178.