

# Effets d'un protocole de déplétion-réplétion en phosphore et calcium sur l'utilisation digestive et métabolique de phosphore et de calcium chez le porc en croissance

Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1), Paulo-Alberto LOVATTO (2), Candido POMAR (1)

(1) Agriculture Canada, 2000 Rue College, CP 90 Succ Lennoxville, Sherbrooke, QC, J1M 1Z3, Canada

(2) Univ. Federal de Santa Maria, Departamento de Zootecnia, Campus Camobi, RS 97119-9 Santa Maria, Brésil

Marie-Pierre.Letourneau@AGR.GC.CA

## Effets d'un protocole de déplétion-réplétion en phosphore et calcium sur l'utilisation digestive et métabolique de phosphore et de calcium chez le porc en croissance.

L'étude a été conduite afin d'évaluer l'effet de différents protocoles de restriction alimentaire de phosphore (P) et de calcium (Ca) (déplétion) et d'apports adéquats (réplétion) sur le métabolisme de P et de Ca. Soixante-deux porcs ont été nourris selon un programme d'alimentation en trois phases (25-50, 50-80 et 80-110 kg) avec un aliment contrôle (C) formulé selon les recommandations apportant respectivement 2,9, 2,5 et 2,0 g P digestible/kg pour chacune des périodes de croissance, et un aliment faible en P (L) apportant 1,9, 1,5 et 1,3 g P digestible/kg avec tous deux un ratio Ca/P digestible fixe. Durant ces trois phases de croissance, six protocoles ont été testés : CCC, CCL, CLL, LCC, LLC et LLL. Les résultats montrent que les porcs déplétés en P et Ca ont une utilisation digestive et métabolique accrue, laquelle s'accroît avec la durée de la déplétion. Ces derniers arrivent ainsi à rattraper le déficit de minéralisation osseuse induit par la déplétion, rattrapage qui dépend de la durée de la réplétion. Ces adaptations constituent une stratégie alternative prometteuse pour réduire l'apport alimentaire de P aux porcs. Avant la mise en œuvre de telles stratégies d'alimentation dans la pratique, d'autres études sont nécessaires pour affiner le degré, le moment et la durée des périodes de déplétion et de réplétion dans le but d'atteindre un minimum de changements dans la minéralisation osseuse sans affecter les performances de croissance et le bien-être des porcs tout en favorisant une utilisation accrue de Ca et de P.

## Effect of phosphorus and calcium depletion-repletion protocols on the digestive and metabolic utilization of phosphorus and calcium in growing pigs

The effect of different protocols of dietary phosphorus (P) and calcium (Ca) restriction (depletion) and the recovery (repletion) on their metabolisms was studied. Sixty-two pigs were fed a three-phase feeding program (25-50, 50-80 and 80-110 kg) with either a control diet (C), which provided the recommended digestible P level of 2.9, 2.5 and 2.0 g digestible P/kg for each growing phase, respectively, or a low-P diet (L) providing 1.9, 1.5 and 1.3 g digestible P/kg for each growing phase, respectively; both feeding programs had a constant Ca/digestible P ratio. During the three growing phases, six protocols were tested: CCC, CCL, CLL, LCC, LLC and LLL. Pigs fed the depleted P and Ca diet had higher digestive and metabolic mineral utilization, which was also increased with the duration of the depletion. These metabolic adaptations allowed pigs to catch up on the bone mineralization deficit induced by depletion; a catch-up that depended on the duration of the repletion. These adaptations may be a promising alternative to decreasing fed and excreted P by pigs. However, practical applications of these adaptation processes require more studies to fine-tune the degree, the timing and the duration of depletion and repletion period to achieve minimum changes in bone mineralization without affecting growth performance and welfare of pigs.

## INTRODUCTION

La réduction des apports alimentaires de phosphore (P) aux porcs et l'optimisation de son utilisation sont des façons efficaces de réduire l'impact négatif de ce minéral sur l'environnement. Néanmoins, les fonctions métaboliques vitales associées au P imposent une juste maîtrise de sa réduction pour ne pas affecter les performances de croissance. L'effet de restrictions alimentaires en Ca et P (i.e. déplétion) et de phases de récupération (i.e. réplétion) sur le métabolisme de Ca et de P a été étudié chez le rat (Drivdahl *et al.*, 1984), l'homme (Akesson *et al.*, 1998) et le poulet (Ashwell, 2009). Chez le porcelet, il a été montré qu'une alimentation carencée en Ca et P induit des régulations métaboliques qui améliorent leur utilisation digestive et métabolique permettant ainsi de faire face à la déficience en phase de déplétion et une utilisation accrue en phase de réplétion (Létourneau-Montminy *et al.*, 2010). Tout dépendant des conséquences sur la santé et la croissance des animaux, ces adaptations pourraient faire partie d'une stratégie visant à réduire les apports de P

alimentaire aux porcs en croissance. L'objectif de cette étude était donc d'étudier l'impact de différents protocoles de déplétion-réplétion chez le porc en croissance.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Aliments expérimentaux

Les porcs ont été nourris selon un plan d'alimentation en trois phases de 28 jours (25-50 kg, 50-80 kg et 80-110 kg de poids vif, PV) de façon à satisfaire l'ensemble de leurs besoins nutritionnels à l'exception de ceux de P et de Ca. L'expérimentation a débuté lorsque les porcs ont atteint  $21,1 \pm 2,3$  kg de PV, suite à une période d'adaptation aux aliments d'une durée de 7 jours. Deux aliments ont été formulés pour chaque phase de croissance, dont un contrôle (C) apportant, en accord avec les recommandations actuelles (Jondreville et Dourmad, 2005), respectivement 2,9, 2,5 et 2,0 g P digestible/kg pour chacune des phases de croissance et un second à faible concentration en P (L) apportant respectivement par phase 1,9, 1,5 et 1,3 g P digestible/kg (Tableau 1).

**Tableau 1** – Aliments expérimentaux par phase de croissance

| Phase de croissance                             | Phase 1 : 25 - 50 kg |       | Phase 2 : 50 - 80 kg |       | Phase 3 : 80 - 112kg |       |
|---|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
|   | C                    | L     | C                    | L     | C                    | L     |
| <b>Aliments<sup>1</sup></b>                     |                      |       |                      |       |                      |       |
| <b>Ingrédients (g/kg)</b>                       |                      |       |                      |       |                      |       |
| <b>Maïs</b>                                     | 557                  | 532   | 600                  | 550   | 600                  | 576   |
| <b>Tourteau de soja</b>                         | 240                  | 231   | 172                  | 161   | 115                  | 110   |
| <b>Blé</b>                                      | 150                  | 150   | 150                  | 150   | 150                  | 150   |
| <b>Orge</b>                                     | -                    | 54,8  | 33,2                 | 112   | 97,3                 | 139   |
| <b>Gras animal</b>                              | 7,12                 | -     | 4,92                 | -     | 4,08                 | -     |
| <b>Carbonate de calcium</b>                     | 13,6                 | 7,28  | 11,1                 | 5,12  | 8,35                 | 4,30  |
| <b>Phosphate bicalcique (21% P, 28% Ca)</b>     | 12,2                 | 5,37  | 9,80                 | 3,35  | 7,16                 | 2,72  |
| <b>L-Lysine-HCl (98%)</b>                       | 2,70                 | 2,84  | 2,46                 | 2,61  | 2,07                 | 2,13  |
| <b>L-Thréonine</b>                              | 0,241                | 0,282 | 0,156                | 0,210 | -                    | -     |
| <b>Méthionine</b>                               | 0,634                | 0,599 | 0,222                | 0,183 | -                    | -     |
| <b>Prémix vitamines et minéraux<sup>2</sup></b> | 16,46                | 15,86 | 16,48                | 15,98 | 16,04                | 15,68 |
| <b>Composition chimique analysée (g/kg)</b>     |                      |       |                      |       |                      |       |
| <b>Énergie digestible, Mcal/kg<sup>3</sup></b>  | 3,42                 | 3,42  | 3,42                 | 3,42  | 3,42                 | 3,42  |
| <b>Matière sèche</b>                            | 876                  | 889   | 885                  | 879   | 878                  | 877   |
| <b>Protéines brutes<sup>3</sup></b>             | 177                  | 177   | 153                  | 153   | 135                  | 135   |
| <b>Calcium</b>                                  | 10,6                 | 7,70  | 9,90                 | 6,43  | 7,48                 | 4,90  |
| <b>Phosphore</b>                                | 6,0                  | 4,76  | 5,6                  | 4,36  | 5,28                 | 4,42  |
| <b>Phosphore digestible<sup>3</sup></b>         | 2,90                 | 1,87  | 2,46                 | 1,50  | 2,01                 | 1,35  |
| <b>Ca/P total</b>                               | 1,77                 | 1,62  | 1,76                 | 1,48  | 1,42                 | 1,11  |
| <b>Ca/P digestible</b>                          | 3,65                 | 4,12  | 4,02                 | 4,29  | 3,72                 | 3,63  |

<sup>1</sup> C, aliment témoin; L, aliment avec apports alimentaire réduits de Ca et de P

<sup>2</sup> Apport (kg d'aliment) : P1 : vit A, 10497 IU ; vit D, 1049,7 IU ; vit E, 32 IU ; vit K, 0,81 mg ; vit B12, 0,03 mg ; acide folique, 0,21 mg ; niacine, 15 mg ; acide pantothénique, 11,8 mg ; pyridoxine, 0,93 mg ; riboflavine, 3,29 mg ; thiamine, 1,33 mg ; choline, 500 mg ; Cu, 117 mg ; I, 0,27 mg ; Fe, 196,6 mg ; Mn, 63,3 mg ; Se, 0,3 mg ; Zn, 140 mg ; sel, 5 g. P2 : vit A, 9300 IU ; vit D, 930 IU ; vit E, 28 IU ; vit K, 0,76 mg ; vit B12, 0,02 mg ; acide folique, 0,13 mg ; niacine, 13,4 mg ; acide pantothénique, 11,3 mg ; pyridoxine, 0,72 mg ; riboflavine, 3,05 mg ; thiamine, 1,2 mg ; choline, 460 mg ; Cu, 110 mg ; I, 0,25 mg ; Fe, 178 mg ; Mn, 54 mg ; Se, 0,3 mg ; Zn, 124 mg ; sel, 5 g. P3 : vit A, 9597 IU ; vit D, 960 IU ; vit E, 29 IU ; vit K, 0,77 mg ; vit B12, 0,02 mg ; acide folique, 0,15 mg ; niacine, 13,8 mg ; acide pantothénique, 11,4 mg ; pyridoxine, 0,77 mg ; riboflavine, 3,11 mg ; thiamine, 1,23 mg ; choline, 420 mg ; Cu, 112 mg ; I, 0,26 mg ; Fe, 183 mg ; Mn, 56,3 mg ; Se, 0,3 mg ; Zn 128 mg ; sel, 5 g.

<sup>3</sup> Calculé selon les tables INRA-AFZ (INRA-AFZ, 2002)

Les changements d'aliments entre les phases ont permis la formation de 6 régimes alimentaires globaux (Tableau 2). Les aliments ont été distribués aux animaux sous forme de granulés de 4 mm. Les porcs ont été nourris et abreuvés à volonté en tout temps.

**Tableau 2** – Dispositif expérimental<sup>1</sup>

| Traitements alimentaires | 25-50 kg | 50-80 kg | 80-110 kg |
|--------------------------|----------|----------|-----------|
| 1                        | C        | C        | C         |
| 2                        | C        | C        | L         |
| 3                        | C        | L        | L         |
| 4                        | L        | C        | C         |
| 5                        | L        | L        | C         |
| 6                        | L        | L        | L         |

<sup>1</sup> C, aliment témoin; L, aliment avec apports alimentaire réduits de Ca et de P

## 1.2. Essai de croissance

Soixante-douze porcs mâles castrés ont été assignés à un des six traitements expérimentaux au hasard et logés en groupe. La consommation journalière et le poids hebdomadaire ont été mesurés tout au long de l'essai. Au début de chaque phase de croissance, le contenu (CMO) et la densité minérale osseuse (DMO) de la région des vertèbres lombaires L2 à L4 des porcs ont été obtenus par absorptiométrie aux rayons X à double intensité (DXA) (DPX-L, Lunar Corp., Madison, WI). Les porcs ont été mis à jeun au moins 6 heures avant chacun des scans.

Le jour de l'analyse, les porcs ont été pesés et anesthésiés par injection intramusculaire de 0,05 mg / kg de sulfate d'atropine, 2 mg / kg de Rompon (xylazine) et 20 mg / kg de kétamine (Rogarsetic). Lorsque nécessaire, du gaz isoflurane a été appliqué par masque à dose maximale de 2 % pour maintenir l'anesthésie. Des échantillons sanguins ont été prélevés avant les scans dans des tubes Vacutainer contenant 100 USP d'héparine de sodium et stockés sur la glace. Les porcs ont ensuite été réveillés dans une pièce calme et replacés dans leur enclos respectif.

## 1.3. Essai de digestibilité

Trente autres porcs de caractéristiques similaires aux 72 participants à l'essai de croissance ont été logés avec ces derniers et ont participé à l'essai de digestibilité.

Deux périodes de collecte totale des fèces et des urines ont été réalisées au début de la 2<sup>ème</sup> et de la 3<sup>ème</sup> phase de croissance afin d'estimer l'utilisation digestive et métabolique de P et de Ca alimentaire. Les porcs de cet essai ont été adaptés à l'aliment expérimental durant les 5 premiers jours de la phase avant d'être transférés dans les cages métaboliques permettant la collecte séparée des fèces et des urines. Une période d'adaptation aux cages de 2 jours a précédé les 5 jours de collecte. Les animaux ont été nourris deux fois par jour, l'eau et la nourriture étant offertes à volonté. La consommation d'aliment a été mesurée tous les jours et les fèces et les urines collectées deux fois par jour. L'urine collectée était maintenue à un pH inférieur à 3 avec l'ajout de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 M.

Après homogénéisation, des échantillons de fèces et d'urines ont été congelés à -20°C en vue de l'analyse chimique.

## 1.4. Analyses chimiques

Les aliments et les fèces ont été séchés sous vide à 85°C puis incinérés (550°C, 8 heures). Les cendres ont été solubilisées avec de l'HCl 3 N. Le Ca a été dosé par spectrométrie d'absorption atomique (Perkinelmer Aanalyt 300, Whaltham, MA) et le P selon la méthode colorimétrique Vanadate (Perkinelmer Lambda-35, Whaltham, MA).

## 1.5. Analyse statistiques

Les différents critères d'utilisation de P et de Ca mesurés ont été analysés selon un dispositif complètement aléatoire. Les effets des aliments distribués aux phases de croissance 1, 2 et 3 et leurs interactions ont été évalués avec des contrastes orthogonaux au moyen de la procédure MIXED de SAS (2002).

## 2. RESULTATS

Les concentrations en P des aliments expérimentaux étaient conformes aux valeurs attendues, alors que celles de Ca étaient environ 30 % plus élevées.

Le gain moyen quotidien (GMQ) n'était pas modifié par les traitements alimentaires. Quelques effets significatifs des traitements ont par ailleurs été observés sur la consommation moyenne journalière (CMJ), mais feront l'objet d'une autre communication ultérieurement.

### 2.1. Première phase de croissance

Le GMQ et la CMJ des porcs étaient respectivement de 893 g/j et de 1.76 kg/j pendant cette phase d'alimentation. Les porcs ont débuté la consommation du régime expérimental 7 jours avant le début de l'expérimentation. Au début de l'expérimentation (25 kg PV), la concentration de P plasmatique était similaire entre les traitements alors que les porcs ayant reçu l'aliment L avaient déjà une DMO (P < 0,001) et un CMO (P < 0,001) ainsi qu'une concentration plasmatique de Ca (P < 0,05) réduits par rapport à ceux ayant reçu l'aliment C (Tableau 3).

A 50 kg PV, la DMO et le CMO demeuraient réduits chez les porcs nourris avec l'aliment L (P < 0,001).

Le gain quotidien de CMO et la concentration plasmatique de Ca n'étaient pas affectés par les traitements alimentaires, tandis que les porcs nourris avec l'aliment L étaient en hyperphosphorémie (P < 0,001).

### 2.2. Deuxième phase de croissance

Le GMQ et la CMJ des porcs étaient respectivement de 1002 g/j et de 2.50 kg/j. La DMO et le CMO étaient diminués chez les porcs nourris avec l'aliment L par rapport à C, à la fois durant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> phase de croissance (P < 0,01). Le gain quotidien de CMO était respectivement augmenté et diminué chez les animaux ayant reçu l'aliment L durant les phases de croissance un et deux (P < 0,001). Par conséquent, les porcs ayant consommé l'aliment L en 1<sup>ère</sup> phase suivi de l'aliment C en 2<sup>ème</sup> phase de croissance étaient les plus efficaces à déposer des minéraux au niveau osseux (Tableau 4).

**Tableau 3** - Caractéristiques minérales de la région lombaire et concentrations plasmatiques de phosphore et de calcium durant la phase de croissance 25-50 kg<sup>1,2</sup>

| Variables                                     | Aliments |       | ETR   | Probabilité |
|---|----------|-------|-------|-------------|
|   | C        | L     |       |             |
| n   | 36       | 36    |       |             |
| <b>Caractéristiques minérales<sup>2</sup></b> |          |       |       |             |
| DMO (mg/cm <sup>2</sup> )                     | 771      | 657   | 8,96  | < 0,001     |
| CMO (mg)                                      | 17666    | 12617 | 398   | < 0,001     |
| Gain CMO (mg/j)                               | 307      | 290   | 31,0  | 0,704       |
| <b>Concentrations plasmatiques (mg/L)</b>     |          |       |       |             |
| Calcium                                       | 114      | 115   | 0,955 | 0,712       |
| Phosphore                                     | 141      | 151   | 1,87  | < 0,001     |

<sup>1</sup> ETR, Écart-type résiduel ; C, aliment témoin ; L, aliments avec apports alimentaire réduits de Ca et de P ; DMO, Densité minérale osseuse ; CMO, Contenu minéral osseux

<sup>2</sup> A 25 kg : DMO (mg/cm<sup>2</sup>), C = 529, L = 434 (P < 0,001); CMO (mg), C = 9080, L = 4618 (P < 0,001); Concentration plasmatique de Ca (mg/L), C = 118, L = 115 (P < 0,05) ; Concentration plasmatique de P (mg/L), C = 114, L = 115 (P = 0,36)

<sup>3</sup> Résultats de scan de la région des vertèbres L2 à L4

**Tableau 4** - Caractéristiques minérales de la région lombaire, bilans et concentrations plasmatiques de phosphore et de calcium durant la phase de croissance 50-80 kg<sup>1</sup>

| Variables                                     | Aliments |       |       |       | ETR   | Probabilités |         |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------|-------|
|   | CC       | CL    | LC    | LL    |       | P1           | P2      | P1xP2 |
| n <sup>2</sup>                                | 24       | 12    | 12    | 24    |       |              |         |       |
| <b>Bilan de phosphore</b>                     |          |       |       |       |       |              |         |       |
| Ingéré (g/j)                                  | 11,0     | 9,01  | 12,3  | 9,17  | 0,924 | 0,387        | 0,005   | 0,501 |
| Excrétion fécale (g/j)                        | 5,18     | 4,86  | 5,90  | 4,67  | 0,604 | 0,638        | 0,095   | 0,225 |
| Excrétion urinaire (g/j)                      | 0,565    | 0,082 | 0,554 | 0,061 | 0,152 | 0,885        | < 0,001 | 0,960 |
| Absorbé (g/j)                                 | 5,80     | 4,14  | 6,36  | 4,50  | 0,780 | 0,313        | 0,002   | 0,926 |
| Retenu (g/j)                                  | 5,24     | 4,06  | 5,81  | 4,44  | 0,854 | 0,316        | 0,022   | 0,945 |
| Coefficient d'absorption (%)                  | 51,5     | 44,3  | 52,0  | 49,3  | 6,12  | 0,156        | 0,030   | 0,295 |
| Coefficient de rétention (%)                  | 45,4     | 43,3  | 47,7  | 48,6  | 6,84  | 0,158        | 0,619   | 0,534 |
| Rétention (% absorption)                      | 90,3     | 98,0  | 91,3  | 98,6  | 3,69  | 0,425        | 0,010   | 0,748 |
| <b>Bilan de calcium</b>                       |          |       |       |       |       |              |         |       |
| Ingéré (g/j)                                  | 19,3     | 13,3  | 21,5  | 13,5  | 1,57  | 0,380        | < 0,001 | 0,476 |
| Excrétion fécale (g/j)                        | 8,83     | 5,93  | 9,65  | 5,71  | 1,39  | 0,881        | 0,002   | 0,517 |
| Excrétion urinaire (g/j)                      | 0,862    | 1,29  | 0,952 | 1,54  | 0,227 | 0,206        | 0,005   | 0,543 |
| Absorbé (g/j)                                 | 10,4     | 7,37  | 11,9  | 7,82  | 1,61  | 0,298        | 0,002   | 0,727 |
| Retenu (g/j)                                  | 9,58     | 6,09  | 10,9  | 6,29  | 1,47  | 0,381        | < 0,001 | 0,647 |
| Coefficient d'absorption (%)                  | 53,0     | 54,0  | 55,7  | 57,5  | 7,27  | 0,297        | 0,943   | 0,794 |
| Coefficient de rétention (%)                  | 48,1     | 43,8  | 51,3  | 46,0  | 6,84  | 0,404        | 0,197   | 0,999 |
| Rétention (% absorption)                      | 90,1     | 79,7  | 92,2  | 79,4  | 3,69  | 0,787        | 0,002   | 0,720 |
| <b>Caractéristiques minérales<sup>3</sup></b> |          |       |       |       |       |              |         |       |
| DMO (mg/cm <sup>2</sup> )                     | 962      | 835   | 903   | 784   | 15,3  | < 0,001      | < 0,001 | 0,763 |
| CMO (mg)                                      | 33000    | 25064 | 29916 | 23319 | 902   | 0,003        | < 0,001 | 0,394 |
| Gain CMO (mg/j)                               | 550      | 259   | 641   | 354   | 24,1  | < 0,001      | < 0,001 | 0,626 |
| <b>Concentrations plasmatiques (mg/L)</b>     |          |       |       |       |       |              |         |       |
| Calcium                                       | 112      | 110   | 117   | 114   | 1,91  | 0,014        | 0,103   | 0,851 |
| Phosphore                                     | 136      | 133   | 127   | 128   | 2,55  | 0,002        | 0,659   | 0,325 |

<sup>1</sup> C, Aliment témoin ; L, Aliment avec apports alimentaire réduits de Ca et de P; ETR, Écart-type résiduel ; P1, Aliment phase de croissance 1 ; P2, Aliment phase de croissance 2 ; DMO, Densité minérale osseuse ; CMO, Contenu minéral osseux

<sup>2</sup> Nombre de porc par traitement pour bilans Ca et P : CC, 9 ; CL, 5 ; LC, 5 ; LL, 9

<sup>3</sup> Résultats de scan de la région des vertèbres L2 à L4

La concentration de Ca plasmatique était augmentée (P < 0,05) chez les porcs nourris avec l'aliment L par rapport à C durant la 1<sup>ère</sup> phase de croissance, tandis que la concentration de P plasmatique était diminuée (P < 0,01). Les concentrations plasmatiques de P et de Ca n'étaient pas modifiées par les traitements alimentaires de la 2<sup>ème</sup> phase de croissance.

Les traitements alimentaires reçus durant la 1<sup>ère</sup> phase de croissance n'ont pas modifié le bilan de P et de Ca (Tableau 4). La consommation de P était réduite chez les porcs nourris avec l'aliment L (LL, CL) par rapport à C (LC, CC) (P < 0,01). L'excrétion urinaire de P et le P absorbé et retenu par jour étaient significativement réduits par rapport aux porcs alimentés avec l'aliment C (P < 0,05 ; Tableau 4).

Le coefficient d'absorption de P était également réduit chez les porcs nourris avec l'aliment L ( $P < 0,05$ ), tandis que le coefficient de rétention n'était pas modifié et le P retenu en pourcentage de celui absorbé augmenté comparativement aux porcs ayant reçu l'aliment C ( $P < 0,01$ ). Le Ca ingéré, excrété dans les fèces, absorbé, retenu et retenu en pourcentage de l'absorbé étaient réduits ( $P < 0,01$ ) chez les porcs nourris avec l'aliment L (LL et CL) par rapport à C (LC et CC) durant la 2<sup>ème</sup> phase de croissance. L'excrétion urinaire de Ca était augmentée chez les porcs ayant reçu l'aliment L par rapport à C ( $P < 0,01$ ). Enfin, les coefficients d'absorption et de rétention de Ca n'étaient pas modifiés par les traitements alimentaires reçus pendant la 2<sup>ème</sup> phase de croissance.

### 2.3. Troisième phase de croissance

Le GMQ et la CMJ des porcs durant cette phase d'alimentation étaient respectivement de 1009 g/j et de 3.07 kg/j. Les DMO et CMO étaient modifiés uniquement par les traitements alimentaires de la 2<sup>ème</sup> ( $P < 0,001$ ) et de la 3<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P < 0,01$ ) (Tableau 5). Une interaction triple était observée pour le gain quotidien de CMO ( $P < 0,05$ ) en raison de l'importante efficacité des porcs ayant reçu le traitement LLC.

Une interaction triple a également été observée pour la concentration de Ca plasmatique ( $P < 0,05$ ). La concentration de P plasmatique était accrue chez les porcs nourris avec l'aliment L par rapport à C durant la 1<sup>ère</sup> ( $P < 0,001$ ) et la 2<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P < 0,05$ ), alors que l'inverse était observé pour les traitements alimentaires reçus durant la 3<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P < 0,05$ ). Une tendance à l'interaction double entre l'aliment consommé durant la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> phase de croissance était également observée pour le P plasmatique ( $P2 \times P3, P = 0,06$ ).

Une interaction double entre le traitement de la 1<sup>ère</sup> et de la 3<sup>ème</sup> et entre celui de la 2<sup>ème</sup> et la 3<sup>ème</sup> phase de croissance ont été observées pour le P ingéré ( $P < 0,05$ ). L'excrétion de P dans les fèces était réduite ( $P < 0,01$ ) chez les porcs ayant consommé l'aliment L durant la première et la 2<sup>ème</sup> phase de croissance (LLL et LLC) et l'impact de l'aliment reçu durant la 3<sup>ème</sup> phase de croissance avait tendance à dépendre de celui reçu durant la 1<sup>ère</sup> phase de croissance ( $P1 \times P3, P = 0,06$ ). L'excrétion urinaire de P était uniquement influencée par l'aliment reçu durant la 2<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P = 0,07$ ). Les porcs ayant reçu l'aliment L durant la 3<sup>ème</sup> phase absorbaient ( $P < 0,01$ ) et renaient ( $P < 0,05$ ) moins de P que ceux nourris avec l'aliment C. L'efficacité d'absorption et de rétention de P étaient augmentées chez les porcs nourris avec l'aliment L par rapport à C durant la 1<sup>ère</sup> phase ( $P < 0,01$ ), alors qu'il y avait également une tendance à une plus grande efficacité de rétention chez les porcs nourris avec l'aliment L en 2<sup>ème</sup> phase de croissance également ( $P = 0,06$ ).

Les porcs ayant reçu les traitements LLL et LLC avaient ainsi les coefficients d'absorption de P les plus élevés. La rétention de P exprimée en pourcentage de l'absorbé n'était pas modifiée par les traitements alimentaires.

Une interaction triple ( $P1 \times P2 \times P3, P < 0,001$ ) était observée pour le Ca ingéré. Il y avait une tendance à une interaction double ( $P1 \times P2, P = 0,062$ ) entre les aliments consommés durant la 1<sup>ère</sup> et la 3<sup>ème</sup> phase de croissance pour le Ca excrété dans les fèces alors que la consommation de l'aliment L par rapport à C durant la 2<sup>ème</sup> phase de croissance réduisait l'excrétion de Ca dans les fèces ( $P < 0,001$ ). L'excrétion urinaire de Ca n'était pas influencée par les traitements alimentaires. Une interaction triple pour le Ca absorbé et retenu ( $P < 0,01$ ) était observée en raison des valeurs élevées pour les porcs du traitement LLC. Une interaction double entre les traitements de la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P = 0,05$ ) étaient observées pour le coefficient d'absorption de Ca. Le coefficient de rétention de Ca était quant à lui plus élevé durant la 3<sup>ème</sup> phase de croissance chez les porcs nourris avec l'aliment L à la fois durant la 1<sup>ère</sup> ( $P < 0,001$ ) et la 2<sup>ème</sup> ( $P < 0,05$ ) phase de croissance, alors qu'elle était plus faible chez les porcs ayant consommé l'aliment L durant la 3<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P < 0,05$ ).

Enfin, le rapport entre le Ca retenu et absorbé était plus faible chez les porcs nourris avec l'aliment L durant la 3<sup>ème</sup> phase de croissance ( $P < 0,01$ ).

## 3. DISCUSSION

### 3.1. Effet de la déplétion en calcium et phosphore

Des études précédentes ont clairement démontré qu'une carence en Ca ou P chez le porc en croissance induit une déminéralisation osseuse pendant que des phénomènes de régulation de la calcémie et phosphorémie sont mis en place pour faire face à la carence (ex. : Sommerville *et al.*, 1985; Crenshaw, 2001).

Dans cette étude, la déplétion en Ca et P, et ce même pour une courte période de 7 jours, a induit une diminution de la calcémie et de la minéralisation osseuse, signes d'une carence calcique (Sommerville *et al.*, 1985).

A l'issue de la première phase de croissance, la calcémie ne différait plus entre les traitements, alors que la phosphorémie était augmentée (7%) et la minéralisation osseuse toujours diminuée chez les porcs déplétés (L, -28%). Ces changements dans les concentrations plasmatiques résultent probablement d'une hyperparathyroïdie secondaire développée pour maintenir la calcémie comme précédemment montré chez le porc (Eklou-Kalonji *et al.*, 1999).

Ces auteurs ont également montré que la sécrétion de PTH stimule la synthèse de calcitriol au niveau rénal afin d'augmenter l'absorption de Ca, mais aussi celle de P et agit sur l'os pour augmenter la résorption osseuse.

Ces diverses actions de la PTH sont probablement responsables du maintien des concentrations plasmatiques de P et de Ca durant la 1<sup>ère</sup> phase de déplétion.

A l'issue de la 2<sup>ème</sup> phase de déplétion, le gain quotidien de CMO était augmenté chez les porcs déplétés (58%) en 1<sup>ère</sup> phase de croissance par rapport aux non-déplétés (Figure 1).

Tableau 5 – Caractéristiques minérales de la région lombaire, bilans et concentrations plasmatiques de phosphore et de calcium durant la phase de croissance 80-110 kg<sup>1</sup>

| Variables                                     | Aliments |       |       |       |       |       | Probabilités |        |        |        |         |         |         |              |        |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------------|--------|
|   | CCC      | CCL   | CLL   | LLL   | LLC   | LCC   | ETR          | P1     | P2     | P3     | P1 x P2 | P1 x P3 | P2 x P3 | P1 x P2 x P3 | Tous   |
| <b>n<sup>2</sup></b>                          | 12       | 12    | 12    | 12    | 11    | 12    |              |        |        |        |         |         |         |              |        |
| <b>Bilan de phosphore</b>                     |          |       |       |       |       |       |              |        |        |        |         |         |         |              |        |
| Ingéré (g/j)                                  | 12,8     | 12,5  | 11,5  | 10,3  | 12,7  | 12,4  | 0,657        | 0,109  | 0,004  | 0,006  | 0,791   | 0,032   | 0,027   | 0,126        | 0,002  |
| Excrétion fécale (g/j)                        | 6,27     | 6,46  | 5,95  | 4,62  | 5,54  | 5,99  | 0,572        | 0,003  | 0,005  | 0,759  | 0,409   | 0,059   | 0,296   | 0,554        | 0,011  |
| Excrétion urinaire (g/j)                      | 0,746    | 0,492 | 0,426 | 0,348 | 0,379 | 0,629 | 0,227        | 0,299  | 0,069  | 0,395  | 0,794   | 0,620   | 0,483   | 0,973        | 0,413  |
| Absorbé (g/j)                                 | 6,50     | 6,02  | 5,57  | 5,65  | 7,12  | 6,43  | 0,453        | 0,229  | 0,509  | 0,005  | 0,316   | 0,497   | 0,125   | 0,246        | 0,044  |
| Retenu (g/j)                                  | 5,75     | 5,53  | 5,14  | 5,30  | 6,75  | 5,81  | 0,473        | 0,144  | 0,909  | 0,022  | 0,287   | 0,400   | 0,084   | 0,300        | 0,074  |
| Coefficient d'absorption (%)                  | 50,7     | 48,2  | 48,6  | 55,4  | 56,2  | 51,8  | 3,35         | 0,012  | 0,139  | 0,198  | 0,259   | 0,386   | 0,801   | 0,899        | 0,117  |
| Coefficient de rétention (%)                  | 45,0     | 44,3  | 45,0  | 51,6  | 53,3  | 46,8  | 4,22         | 0,010  | 0,059  | 0,278  | 0,259   | 0,644   | 0,527   | 0,772        | 0,082  |
| Rétention (% absorption)                      | 89,1     | 91,7  | 91,9  | 93,3  | 94,7  | 90,2  | 3,66         | 0,296  | 0,176  | 0,953  | 0,602   | 0,689   | 0,395   | 0,795        | 0,623  |
| <b>Bilan de calcium</b>                       |          |       |       |       |       |       |              |        |        |        |         |         |         |              |        |
| Ingéré (g/j)                                  | 19,1     | 13,9  | 12,8  | 11,4  | 19,0  | 18,6  | 0,855        | 0,033  | <0,001 | <0,001 | 0,729   | 0,078   | 0,053   | <0,001       | <0,001 |
| Excrétion fécale (g/j)                        | 10,3     | 8,42  | 7,32  | 4,78  | 7,82  | 10,0  | 1,03         | 0,008  | <0,001 | 0,153  | 0,084   | 0,062   | 0,884   | 0,183        | <0,001 |
| Excrétion urinaire (g/j)                      | 0,785    | 0,828 | 0,828 | 0,941 | 0,891 | 0,677 | 0,191        | 0,850  | 0,339  | 0,532  | 0,412   | 0,665   | 0,715   | 0,882        | 0,853  |
| Absorbé (g/j)                                 | 8,82     | 5,44  | 5,47  | 6,63  | 11,13 | 8,58  | 0,701        | <0,001 | 0,790  | <0,001 | 0,055   | 0,889   | 0,094   | 0,003        | <0,001 |
| Retenu (g/j)                                  | 8,04     | 4,62  | 4,64  | 5,69  | 10,24 | 7,90  | 0,738        | <0,001 | 0,995  | <0,001 | 0,101   | 0,981   | 0,131   | 0,004        | <0,001 |
| Coefficient d'absorption (%)                  | 46,2     | 39,3  | 43,1  | 58,4  | 58,8  | 46,1  | 5,37         | <0,001 | 0,003  | 0,102  | 0,050   | 0,064   | 0,910   | 0,484        | 0,002  |
| Coefficient de rétention (%)                  | 42,1     | 33,3  | 36,7  | 50,0  | 54,0  | 42,5  | 5,28         | <0,001 | 0,022  | 0,027  | 0,110   | 0,158   | 0,849   | 0,371        | 0,005  |
| Rétention (% absorption)                      | 91,0     | 85,9  | 82,3  | 85,6  | 92,0  | 91,9  | 3,71         | 0,186  | 0,246  | 0,010  | 0,551   | 0,900   | 0,660   | 0,798        | 0,133  |
| <b>Caractéristiques minérales<sup>3</sup></b> |          |       |       |       |       |       |              |        |        |        |         |         |         |              |        |
| DMO (mg/cm <sup>2</sup> )                     | 1048     | 1029  | 962   | 927   | 994   | 1046  | 21,3         | 0,183  | <0,001 | 0,002  | 0,811   | 0,279   | 0,403   | 0,976        | <0,001 |
| CMO (mg)                                      | 43123    | 44563 | 38449 | 37475 | 42596 | 45125 | 1955         | 0,840  | 0,003  | 0,028  | 0,926   | 0,148   | 0,128   | 0,519        | 0,020  |
| Gain CMO (mg/j)                               | 472      | 386   | 478   | 474   | 722   | 543   | 45,3         | <0,001 | 0,014  | <0,001 | 0,942   | 0,123   | 0,107   | 0,015        | <0,001 |
| <b>Concentrations plasmatiques (mg/L)</b>     |          |       |       |       |       |       |              |        |        |        |         |         |         |              |        |
| Calcium                                       | 115      | 115   | 112   | 112   | 115   | 105   | 1,78         | 0,062  | 0,366  | 0,479  | <0,001  | 0,253   | 0,014   | 0,040        | 0,002  |
| Phosphore                                     | 117      | 108   | 115   | 125   | 123   | 124   | 2,89         | <0,001 | 0,043  | 0,022  | 0,705   | 0,132   | 0,064   | 0,875        | <0,001 |

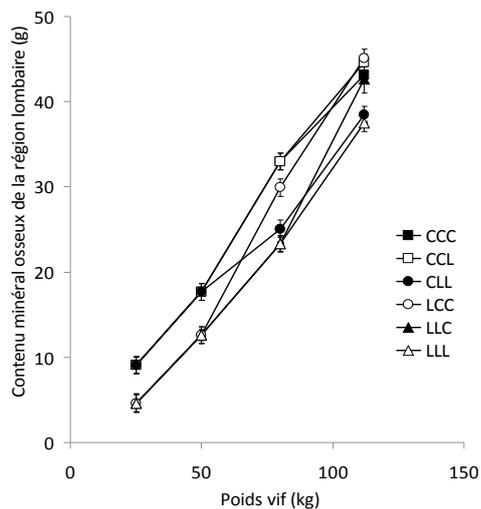
<sup>1</sup> C, Aliment témoin ; L, Aliment avec apports alimentaires réduits de Ca et de P ; ETR, Écart-type résiduel ; P1, Aliment phase de croissance 1 ; P2, Aliment phase de croissance 2 ; P3, Aliment phase de croissance 3 ; DMO, Densité minérale osseuse ; CMO, Contenu minéral osseux

<sup>2</sup> Nombre de porc par traitement pour bilans Ca et P : CCC, 5 ; CLL, 5 ; LLL, 5 ; LLC, 5 ; LCC, 5

<sup>3</sup> Résultats de scan de la région des vertèbres L2 à L4

La restriction en P et Ca est bien connue pour augmenter l'efficacité d'absorption de P et de Ca chez le porc (ex. : Sommerville *et al.*, 1985 ; Sadoris *et al.*, 2009). Néanmoins, l'utilisation digestive de P et de Ca n'était pas augmentée chez les animaux déplétés, ce qui semble illogique.

Cette discordance pourrait provenir du fait que les bilans métaboliques ont été réalisés au début de la seconde phase de croissance et pourraient ainsi ne pas être représentatifs de la phase entière.



**Figure 1** - Evolution du contenu minéral osseux de la région lombaire des vertèbres L2 à L4 en fonction du poids vif des porcs. C, Aliment témoin; L, Aliment avec apports alimentaires réduits de Ca et de P.

Les résultats des bilans métaboliques réalisés au début de la 3<sup>ème</sup> phase de croissance montrent une utilisation digestive de Ca et de P accrue chez les porcs qui ont subi une déplétion. L'efficacité d'utilisation digestive de Ca était, de plus, proportionnelle à la durée de la déplétion; les porcs déplétés durant les deux premières phases avaient un coefficient d'absorption de Ca de 59 % par rapport à 46 et 43% pour ceux consommant l'aliment LC et CC respectivement. La sévérité de la déficience engendrée pourrait être en cause pour expliquer ce résultat comme il a été observé chez le rat (Drivdahl *et al.*, 1984). Le coefficient d'absorption de P n'était quant à lui augmenté que chez les porcs déplétés durant la 1<sup>ère</sup> phase de croissance (+11 %), possiblement en raison d'un manque de P absorbable apporté par l'aliment L en 2<sup>ème</sup> phase de croissance, compte tenu d'une digestibilité déjà élevée (> 50%). Une utilisation digestive accrue de P et de Ca (5%) suite à une phase de déplétion (-60% P digestible) de 10 jours a été observée chez des porcelets (Létourneau-Montminy *et al.*, 2010). Les résultats de la présente étude confirment que des adaptations similaires peuvent se produire tout au long de la croissance du porc.

### 3.2. Effet de la réplétion en calcium et phosphore

En raison d'une efficacité accrue du dépôt de CMO en réponse à l'hypocalcémie, les porcs déplétés durant la 1<sup>ère</sup> phase de croissance et qui ont reçu par la suite l'aliment C

(LCC) ont pu récupérer en bonne partie le déficit de minéralisation osseuse à l'issue de la 2<sup>ème</sup> phase de croissance (Figure 1). A la fin de la troisième phase de croissance, soit après 56 jours de réplétion, leur CMO ne différait plus de celui des CCC indiquant que ces animaux avaient rattrapé complètement le déficit de minéralisation induit par la déplétion. En situation d'hypocalcémie, la PTH est sécrétée et agit notamment pour favoriser la résorption osseuse en augmentant le nombre et l'activité des ostéoclastes libérant ainsi du Ca contenu dans l'os.

En raison de l'étroit couplage entre les ostéoclastes et des ostéoblastes, l'activité de ces derniers est également accrue lors d'hypocalcémie. Eklou-Kalonji *et al.* (1999) ont en effet montré une augmentation des surfaces ostéoblastiques et ostéoclastiques chez des porcs carencés en Ca.

Par conséquent, en phase de réplétion l'activité des ostéoclastes est réduite et l'accrétion osseuse parallèlement augmentée en raison du nombre important d'ostéoblastes et du substrat disponible permettant de réparer la perte osseuse induite par la déplétion.

Des adaptations similaires permettant de rattraper le déficit osseux ont préalablement été observées chez le porc et le poulet (Létourneau-Montminy *et al.*, 2008, 2010 ; Ashwell, 2009).

Une interaction triple était observée sur le gain de CMO durant la 3<sup>ème</sup> phase de croissance en raison d'un dépôt élevé pour les porcs ayant reçu le traitement LLC.

Ces derniers déposaient 53 % plus de CMO que ceux ayant reçu CCC (722 vs 472 mg/j) leur permettant ainsi de rattraper le déficit de minéralisation (42.6 vs 43.1 g), et ce en une seule phase de réplétion, en raison d'une capacité d'absorption accrue par la déplétion imposée de 25 à 80 kg.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats de cette étude, ainsi que ceux obtenus chez différentes espèces (ex. : Drivdahl *et al.*, 1984 ; Ashwell, 2009 ; Akesson *et al.*, 1998), indiquent que le statut minéral, notamment l'os, a un rôle crucial dans l'utilisation digestive et métabolique de P et de Ca alimentaire.

Il a aussi été observé dans cette étude que les porcs déplétés de 25 à 50 kg PV (i.e. LCC) avaient une utilisation digestive et métabolique accrue de P et de Ca jusqu'à l'abattage, et ce, même s'ils recevaient des apports adéquats de P et Ca par la suite. Cela laisse croire que l'augmentation de l'efficacité d'utilisation générée par une carence en bas âge serait durable, du moins jusqu'à ce que le déficit osseux soit complètement rattrapé.

Cette étude représente une première étape permettant de mieux comprendre le métabolisme phosphocalcique suite à des phases de déplétion et réplétion. Ces connaissances sont essentielles à la réduction de l'apport de P par la modulation de son efficacité d'utilisation. En effet, malgré une réduction de 40% des apports alimentaires de P durant la première période de croissance, la minéralisation osseuse des porcs nourris avec l'aliment LCC était similaire aux témoins (CCC) à la fin de l'expérience. Chez les porcs ayant reçu le traitement LLC, la diminution de la

consommation de phosphate bicalcique a atteint 42% et celle de l'excrétion de P de 18%.

Notons cependant qu'une attention particulière devra être portée aux animaux déplétés afin d'éviter des problèmes de locomotion et de bien-être, bien qu'absents dans l'étude. Les réponses digestives et métaboliques observées

suite à des périodes de déplétion et réplétion constituent, néanmoins, une stratégie prometteuse pour réduire les apports alimentaires de P aux porcs et ainsi les coûts d'alimentation et l'impact environnemental, deux conditions essentielles pour un développement durable de la production porcine.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akesson K., Lau K.H., Johnston P., Imperio E., Baylink D. J., 1998. Effects of short-term calcium depletion and repletion on biochemical markers of bone turnover in young adult women. *J. Clin. End. Met.*, 83, 1921-1927.
- Ashwell C.M., 2009. Nutritional epigenetics: early life conditioning with dietary phosphorus. Proc. Conference "7<sup>th</sup> Annual Mid-Atlantic Nutrition Conference", Maryland, MD, pp. 180-191.
- 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.
- Drivdahl, R. H., Liu C. C., Baylink D. J., 1984. Regulation of bone repletion in rats subjected to varying low-calcium stress. *Am. J. Physiol.*, 246, R190-196.
- Eklou-Kalonji E., Colin Z. E., 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. *Am. Soc. Nutr. Sci.*, 129, 188-193.
- Jondreville, C., Dourmad J.-Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Létourneau-Montminy M. P., Lescoat P., Narcy A., Sauvant D., Bernier J.F., Magnin M., Pomar C., Nys Y., Jondreville C., 2008. Effect of reduced dietary calcium and phytase supplementation on calcium and phosphorus utilisation in broilers with modified mineral status. *Br. Poul. Sci.*, 49, 705-715.
- 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 weaned piglets with modified mineral status. *J. Anim. Sci.*, 88, 1706-1717.
- Saddoris K.L., Fleet J.C., Radcliffe J.S., 2009. Sodium-Dependent phosphate uptake in the jejunum is post-transcriptionally regulated in pigs fed a low-phosphorus diet and is independent of dietary calcium concentration. *J. Nutr.*, 140, 731-736.
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Sauvant D., Pérez J.M., Tran G., Coord., INRA Eds, Paris, 301 p.
- Sommerville B.A., Maunder E., Ross R., Care A.D., Brown R.C. 1985. Effect of dietary calcium and phosphorus depletion on vitamin D metabolism and calcium binding protein in the growing pig. *Horm. Metabol. Res.*, 17, 78-81.