

# Rôle de la nutrition sur les boiteries de la truie

*Karen WEDEKIND (1), Mireille HUARD (2) Mercedes VAZQUEZ-ANON (1)*

*(1) Novus International, Inc., Saint Charles, MO, États-Unis*

*(2) Novus France SA, Nantes, France*

*mireille.huard@novusint.com*

## **Rôle de la nutrition sur les boiteries de la truie**

La longévité des truies est un facteur clé dans la rentabilité du cheptel porcine. Après les problèmes de reproduction, les boiteries constituent la seconde cause de réforme anticipée des truies. L'augmentation de la vitesse de croissance liée à l'utilisation de génétiques modernes s'est accompagnée d'une variété de problèmes osseux et de développement du squelette, comme l'ostéochondrose. En premier lieu, la restriction alimentaire apparaît un moyen efficace indirect, par la réduction de la croissance et du gabarit, pour réduire l'ostéochondrose et/ou les boiteries. L'équilibre entre acides aminés et en particulier les apports en méthionine, thréonine et lysine peuvent également jouer un rôle. La biotine est également souvent citée pour son rôle sur la qualité des sabots et onglons. Les oligo-éléments (particulièrement Zn, Cu et Mn) jouent un rôle important dans la formation de l'os et du squelette. De nombreux essais présentés dans cette synthèse ont démontré les avantages des minéraux organiques pour réduire les boiteries chez les dindes, les vaches laitières et aussi les porcs. Ces améliorations comprennent la réduction du taux de réforme (dû aux problèmes locomoteurs), de la mortalité, des lésions des pattes, l'accroissement de la longévité exprimée par le pourcentage de truies atteignant la 3<sup>ème</sup> portée, une amélioration des scores de mobilité, une amélioration des biomarqueurs sanguins, de la dureté des onglons et de la structure du squelette. Cette revue du rôle de la nutrition sur les boiteries de la truie rapporte également les résultats de deux essais conduits sur des truies alimentées avec des chélates d'hydroxy analogue de méthionine en remplacement total ou partiel de minéraux inorganiques, et leur effet sur les problèmes de locomotion.

## **The role of nutrition in sow lameness**

The longevity of sows is a key factor in the profitability of the pig herd. After reproduction issues, lameness is the second cause of early culling of sows. The increase in growth rate due to the use of modern genetics has been accompanied by a variety of bone and skeletal development problems, such as osteochondrosis. First, feed restriction appears to be an effective way to reduce osteochondrosis and/or lameness. Amino acid balance, in particular those of methionine, threonine, and lysine, can also play a role. Biotin is also often cited for its role in hoof health. Trace elements (especially Zn, Cu, and Mn) play an important role in bone and skeletal formation. Multiple trials have demonstrated benefits of organic trace minerals in reducing lameness in turkeys, dairy cows, and pigs. These improvements include reduced culling rate (due to fewer locomotion problems), reduced mortality and leg injuries, improved longevity, expressed as the percentage of sows reaching the parity 3, improved mobility scores, improved blood biomarkers, increased hoof hardness and improved skeletal structure. This review of the role of nutrition in sow lameness also presents results of two trials performed with sows fed hydroxy analogue methionine chelates as a total or partial replacement of inorganic minerals, and their effect on locomotion problems.

## INTRODUCTION

Les boiteries sont un problème majeur dans les élevages porcins. Les troubles locomoteurs peuvent être associés à des troubles neurologiques, des lésions des onglons ou des membres, des problèmes mécaniques et structurels, des traumatismes ou des maladies métaboliques et infectieuses (Smith, 1988 ; Mohling *et al.*, 2014). La longévité des truies est un facteur clé de la rentabilité des troupeaux de porcs commerciaux (Stalder *et al.*, 2004). Actuellement, aux États-Unis, les taux annuels de réforme et de mortalité des truies sont respectivement de 42,3% et 10,7% (PigCHAMP, 2018). Ces boiteries constituent également un problème important de bien-être animal.

Les boiteries constituent la première raison d'euthanasie et la seconde raison d'abattage involontaire (Pluym *et al.*, 2013) des truies des troupeaux reproducteurs. Après les problèmes de reproduction, les boiteries sont aussi la cause la plus courante de réforme prématurée des truies (Deen *et al.*, 2007 ; McNeil *et al.*, 2018). Il a été montré que 6 à 40 % des réformes de truies sont dues à des problèmes de locomotion, soit 10 % en moyenne (Anil *et al.*, 2009a ; McNeil *et al.*, 2018). En France, Quiniou et Montagne (2017) évoquent selon une enquête GTTT (gestion technique du troupeau de truies) en 2014 un taux de 15% pour les réformes dues aux problèmes d'aplombs en début de carrière.

Les boiteries peuvent affecter la reproduction des truies en influençant leur longévité, leur comportement et leur consommation alimentaire.

Les truies réformées pour cause de boiterie sont retirées du troupeau à un âge plus jeune et produisent moins de portées que les truies réformées pour d'autres raisons (Lucia *et al.*, 2000; Anil *et al.*, 2009a). Pour amortir le coût de remplacement des cochettes, une truie doit rester dans le troupeau reproducteur pendant au moins trois portées (Stalder *et al.*, 2003).

Les boiteries peuvent augmenter le risque d'écrasement des porcelets en raison de mouvements involontaires au moment du coucher des truies (Bonde *et al.*, 2004). Heinonen *et al.* (2006) ont observé des niveaux plus élevés de protéines de la phase aiguë chez les truies boiteuses, ce qui indique la présence de processus inflammatoires tels que ceux modulés par les cytokines. Selon Johnson (1997), en plus d'autres effets biologiques, les cytokines générées par l'inflammation prédisposent les truies à l'anorexie et au comportement léthargique. En outre, Fitzgerald *et al.* (2012) ont fait état d'une réduction de la consommation alimentaire chez des truies dont les onglons sont trop longs. L'abattage précoce des truies dû aux troubles de la locomotion et la réduction de la consommation alimentaire diminuent indirectement le nombre moyen de portées par truie par an et le nombre moyen de porcs sevrés par truie par an, ce qui augmente le coût par porc sevré (Pluym *et al.*, 2013). Une fois retirées du troupeau, les truies boiteuses peuvent être mises sur le marché avec une valeur de reprise plus faible (Anil *et al.*, 2009a). Selon Ritter *et al.* (2009), la moins-value sur les carcasses d'animaux non mobiles à l'abattoir peut représenter jusqu'à 30 % de la valeur totale du porc. Les pertes financières attribuées aux boiteries ont été estimées à 37 euros par truie boiteuse en Allemagne (Grandjot, 2007), à 180 dollars par truie boiteuse aux États-Unis (Deen *et al.*, 2008) et, dans une étude néerlandaise, à 20 à 30 euros par truie (Schuttert, 2008).

Les boiteries engendrent aussi de la douleur pour l'animal, préjudiciable à son bien-être. Depuis le 1er janvier 2013, la directive européenne 2008/120/CE impose le logement des truies gestantes en groupe, ce qui peut engendrer une augmentation des problèmes locomoteurs du fait de l'augmentation des déplacements, par rapport à la conduite en logement individuel (Cador *et al.*, 2014.). Afin de réduire au minimum l'abattage prématuré des truies pour cause de boiterie, et de limiter l'impact économique dû à ce problème, mais aussi par souci du bien-être animal, des méthodes d'évaluation précises, objectives et rapides sont nécessaires, ainsi que des solutions pour y remédier.

## 1. CAUSES DES BOITERIES

Les causes les plus fréquentes de boiterie chez les cochettes et les truies sont l'ostéochondrose (OCD) et l'ostéo-arthrite (OA) ou maladie dégénérative des articulations (MDA) - ces deux affections étant très difficiles à distinguer de l'OCD -, l'arthrite infectieuse et les lésions des membres ou du pied (Dewey *et al.*, 1993 ; Heinonen *et al.*, 2006).

### 1.1. Ostéochondrose (OCD)

L'OCD est particulièrement fréquente chez les cochettes, alors que chez les truies âgées de plus d'un an ou un an et demi cette affection est moins fréquente ou a été résolue (Grondalen, 1974). Il est difficile, voire impossible, de diagnostiquer l'OCD chez un animal vivant (Heinonen *et al.*, 2006). Toth *et al.* (2016), sur la base de mesures histologiques, ont confirmé une incidence de 100% d'OCD chez les porcs à l'âge de 12 semaines, quand seuls 3 des 200 porcs examinés vers 24 semaines d'âge présentaient des lésions d'une gravité suffisante pour entraîner une boiterie clinique. De même, Bertholle *et al.* (2016) ont observé des lésions d'OCD chez 80 % des porcs sevrés, alors qu'à 14 semaines, ils n'observent que des signes insignifiants d'OCD clinique. Olstad *et al.* (2014) ont rapporté que respectivement 51 % et 69 % des lésions subcliniques d'OCD dans le genou et le coude identifiées par tomодensitométrie (CT) se résorbaient avant 26 semaines d'âge. Comme de nombreuses lésions initiales d'OCD régressent ou guérissent sans incident (Dik *et al.*, 1999 ; Billinghamurst *et al.*, 2004), il est nécessaire de disposer d'une méthodologie permettant de différencier les défauts conduisant progressivement aux boiteries de ceux susceptibles de guérir naturellement. La radiographie est la modalité d'imagerie actuellement utilisée chez les chevaux et les humains pour détecter et suivre la progression des OCD (Bertholle *et al.*, 2016, Billinghamurst *et al.*, 2004). Elle permet de détecter des processus de réparation précoces, qui sembleraient se produire au moins jusqu'à l'âge de 14 semaines chez le porc (Bertholle *et al.*, 2016). Billinghamurst *et al.* (2004) ont montré que la radiographie, associée à des biomarqueurs sériques de la synthèse et de la dégradation du squelette et du cartilage, était un outil précieux pour évaluer la gravité de l'OCD.

Divers facteurs ont été identifiés dans le développement des OCD chez le porc, notamment la génétique (Aasmundstad *et al.*, 2013), le logement (Etterlin *et al.*, 2014, Cador *et al.*, 2014), la composition du régime alimentaire (Nakano *et al.*, 1987 ; Frantz *et al.*, 2008 ; Faba *et al.*, 2018), la vitesse de croissance (van Grevenhof *et al.*, 2012 ; de Koning *et al.*, 2013), et les stress mécaniques ou les traumatismes (McCoy *et al.*, 2013 ; Faba *et al.*, 2018). De nombreuses études (Dik *et al.*, 1999 ; van Grevenhof *et al.*, 2012 ; McCoy *et al.*, 2013 ; Bertholle *et al.*,

2016) indiquent une "fenêtre de susceptibilité", dans laquelle les facteurs alimentaires peuvent jouer un rôle clé dans la manifestation des OCD, et un "point de non-retour" au-delà duquel les défauts des OCD deviennent permanents.

Etterlin *et al.* (2015) ont montré que la prévalence et la gravité des OCD était plus importante et significative chez les porcs élevés en plein air que chez ceux élevés en milieu fermé. Par ailleurs, Jorgensen *et al.* (1995a) ont suggéré qu'un seuil de gravité (c'est-à-dire le développement d'une OCD suivi d'une synovite ultérieure) doit être dépassé avant que les porcs ne présentent des signes de boiterie. De même, Etterlin *et al.* (2015) ont constaté que ce n'est que lorsque les porcs présentent une combinaison de lésions nombreuses et graves qu'ils sont susceptibles de présenter des signes cliniques de boiterie.

Du fait que les animaux doivent être en général abattus pour diagnostiquer définitivement par histologie une OCD, celle-ci ne peut pas être un prédicteur des boiteries. Une chronologie des modifications de l'OCD ne peut être établie chez un animal donné qu'en utilisant l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou la tomodensitométrie, ou la radiographie, techniques délicates à mettre en oeuvre ou onéreuses.

## 1.2. Lésions des pieds

L'incidence des lésions des onglons chez les truies est élevée : les estimations varient entre 80 et 96 % (Gjein et Larssen, 1995 ; Grégoire *et al.*, 2013 ; Pluym *et al.*, 2013). Elle augmente avec la parité (Simmins et Brooks, 1988). Toutefois, les résultats sont contradictoires en ce qui concerne le lien entre les lésions du pied et les boiteries. Par exemple, dans l'étude de Pluym *et al.* (2013), bien que 96 % des truies présentaient des lésions aux onglons, le pourcentage d'animaux souffrant de boiterie se situait entre 4 et 8 %. Une grande variabilité dans les types et la gravité des lésions peut rendre difficile la prédiction des boiteries sur la base des lésions des onglons. Selon Gjein et Larssen (1995), Fitzgerald *et al.* (2012), Grégoire *et al.* (2013) et Lisgara *et al.* (2016), les lésions sont plus fréquentes sur les onglons arrière que sur les onglons avant et il y a plus de lésions sur l'orteil latéral que sur l'orteil médian.

La fréquence de boiteries est corrélée positivement aux lésions de talon (Hamoniaux *et al.*, 2014), de la muraille (Deen *et al.* 2007) mais pas aux lésions de la limite sole-talon (Anil *et al.*, 2007). Par ailleurs, Grégoire *et al.* (2013) ont montré que des lésions sévères à la ligne blanche, au talon et à la plante du pied affectent certains paramètres de la marche mesurés par la cinématique. Malgré la difficulté d'établir des corrélations nettes entre les lésions des onglons et les boiteries, certaines études ont montré des effets néfastes des lésions des onglons sur les performances de reproduction, notamment une diminution du nombre de porcelets nés vivants et sevrés par portée, et un poids de portée au sevrage inférieur (Fitzgerald *et al.*, 2012 ; Pluym *et al.*, 2013).

## 2. MESURES DES BOITERIES

### 2.1. Notations subjectives - Scores visuels

Réussir à détecter les boiteries de façon précoce est important pour traiter rapidement le problème et améliorer la productivité et le bien-être.

Les systèmes de notation subjective des boiteries sont conçus pour catégoriser le degré de boiterie exprimé pendant que l'animal marche, et sont généralement basées sur la notation

visuelle d'une démarche et d'une posture anormales (Main *et al.*, 2000). Cependant, d'autres changements de conformation, comme un dos arqué, peuvent être des indicateurs plus utiles des boiteries chez le porc. Grégoire *et al.* (2013) ont ainsi observé que 64 % des truies boiteuses avaient le dos arqué, contre seulement 14 % chez les truies non boiteuses.

Bien que ce système de notation soit relativement rapide et abordable, il est essentiel que les évaluateurs soient formés et expérimentés (Espejo, 2006) car certains de ces systèmes manquent de répétabilité (incohérence de notations entre évaluateurs) (d'Eath, 2012).

Le lien entre les lésions d'OCD et le score de boiterie est complexe. Différentes études sur des cochettes et des truies en loge individuelle ou en groupe se contredisent en rapportant soit l'absence d'association significative (Grondalen 1974 ; Jorgensen *et al.*, 1995a), soit une association faible (Heinonen *et al.*, 2006), ou un impact significatif d'OCD sur les boiteries (de Koning *et al.*, 2012 ; Stavarakakis *et al.*, 2014). L'une des raisons de la divergence entre les études pourrait être due à la réalisation exclusive de mesures subjectives pour évaluer les symptômes cliniques (par exemple, la notation visuelle de la démarche), et au manque de répétabilité inter- et intra-observateurs.

### 2.2. Dureté des onglons

La dureté des onglons peut être mesurée à l'aide d'un duromètre Shore D (Borderas *et al.*, 2004). Le duromètre est généralement utilisé dans l'industrie manufacturière pour caractériser la dureté des plastiques. Peu d'études sur le porc ont mesuré la dureté des onglons et il n'est donc pas certain qu'elle diffère entre les porcs sains et les porcs boiteux. Des études sur les vaches laitières ont cependant démontré un score de dureté des sabots significativement inférieur chez les vaches boiteuses par rapport aux vaches saines, ainsi qu'une augmentation de la dureté des sabots sur une période de 6 mois chez des vaches boiteuses ayant reçu un supplément de minéraux (Zn-Cu-Mn), chélatés sous forme de Chélates de Métaux et d'Hydroxy-Analogue de Méthionine (CMHAM), comparé au contrôle apportant de oligo-éléments inorganiques (OEI) (Zhao *et al.*, 2015).

### 2.3. Mesures dynamiques

La cinétique vise à relier les caractéristiques du mouvement des corps à ses causes et prend en compte les forces dynamiques et l'accélération. Elle est souvent étudiée en utilisant des plaques de force ou des tapis de pression pour mesurer la répartition du poids sur les onglons et les membres (van Der Tol *et al.*, 2003 ; Grégoire *et al.*, 2013).

La cinématique consiste à analyser les mouvements sans tenir compte de leurs causes. Elle est étudiée à l'aide d'un enregistrement vidéo où le corps du sujet est schématisé à l'aide de marqueurs.

Les boiteries sont également évaluées avec des accéléromètres ou enregistreurs de données qui mesurent la tendance naturelle des animaux à s'allonger ou à se lever, ce qui constitue un autre moyen utile de détection des boiteries (Bonde *et al.*, 2004 ; Grégoire *et al.*, 2013). Grégoire *et al.* (2013) ont ainsi comparé les méthodes cinématique et accélérométrique à l'évaluation visuelle de la démarche chez les truies boiteuses et non boiteuses. Ils constatent que les truies boiteuses avaient une longueur de foulée et une vitesse de marche réduites, ainsi qu'un temps d'immobilisation accru, ce qui signifie que le pied

restait au sol plus longtemps pendant la foulée. Les données de l'accéléromètre ont révélé que les truies boiteuses passaient moins de temps en position debout sur une période de 24 heures (6 % du temps pour les truies boiteuses contre 14 % pour les autres), ce qui est en accord avec les observations réalisées sur les vaches (Blackie *et al.*, 2011). Marcon et Courboulay (2017) ont montré qu'il était possible de prédire (avec 90% de succès) une boiterie 24 heures avant son apparition effective chez les truies de rang de portée supérieur à 5 avec un accéléromètre placé à l'oreille. Le système n'est toutefois pas encore assez fiable pour les rangs de portée inférieurs (75%).

#### 2.4. Plaque de force

Une méthode de plaque de force "statique" a été mise au point pour évaluer les boiteries lorsque les truies et les cochettes sont debout et s'est révélée prédictive des boiteries. Le système de plaque de force, développé par Sun *et al.* (2011), a été conçu pour être placé sous une stalle de gestation. Le dispositif de la plaque de force quantifie la force que chaque membre applique à la surface de la plaque. Un animal boiteux distribuera moins de poids sur le(s) membre(s) qui est(ont) douloureux ou structurellement instable(s). Des essais antérieurs (Sun *et al.*, 2011 ; Karriker *et al.*, 2013 ; Abell *et al.*, 2014) ont également démontré la capacité de la plaque de force à détecter les boiteries en mesurant séparément le poids des quatre membres pendant des durées de 5, 15 et 30 minutes. Plus récemment, McNeil *et al.* (2018) ont validé qu'une minute était suffisante pour évaluer avec précision la présence de boiterie. Conte *et al.* (2014) ont constaté que le rapport contra-latéral, défini comme le rapport entre les poids appliqués par les pattes contra-latérales (poids appliqué par la patte la plus légère divisé par le poids appliqué par la patte la plus lourde ; gauche contre droite pour les deux membres avant ou arrière) diminuait avec l'augmentation du score de boiterie pour les pattes arrière.

#### 2.5. Comparatif des méthodes physiques

Les paramètres qui sont significativement affectés par les boiteries diffèrent selon les chercheurs. Par exemple, la force maximale moyenne (exprimée en kg ou en pourcentage du poids corporel) mesurée par Sun *et al.* (2011), Karriker *et al.* (2013) et Abell *et al.* (2014) n'était pas significativement affectée par les boiteries dans l'étude de Conte *et al.* (2014). En revanche, dans l'essai de Conte *et al.* (2014), le rapport contra-latéral et le déplacement du poids étaient les paramètres les plus affectés par les boiteries.

Wedekind *et al.* (2019) ont comparé chez les porcs en finition différentes méthodes objectives d'évaluation des boiteries : notation visuelle de la démarche (0-4 ; 4 plus sévère), plaque de force, dureté des onglons, et lésions des onglons. Huit verrats et sept cochettes (114 ± 15 kg) ont été sélectionnés sur la base de la notation visuelle de la démarche. En moyenne, un poids plus important a été observé sur les pattes avant qu'à l'arrière (60,8% contre 39,2 % du poids total,  $P < 0,05$ ), ce qui est conforme aux conclusions de Conte *et al.* (2014) et de McNeil *et al.* (2018). Conformément à la littérature publiée, les pattes arrière étaient plus touchées par les boiteries que les pattes avant (73 % à l'arrière, 27 % à l'avant). La gravité des lésions de la ligne blanche augmentait avec l'augmentation du score de boiterie ( $P < 0,05$ ) et différait selon le site (plus fréquente à l'avant qu'à l'arrière,  $P < 0,05$ ). La dureté de l'onglon a été évaluée à cinq endroits sur la partie inférieure du sabot à l'aide

d'un duromètre. Sur les cinq endroits, une diminution de la dureté de l'onglon tendait à être observée seulement sur la pointe du pied ( $P = 0,052$ ) avec l'augmentation du score de boiterie. Parmi les mesures de la plaque de force, il y a eu un effet significatif des boiteries ( $P < 0,05$ ) pour la force maximale, la portée (95e percentile-5e percentile), l'écart-type de la force, l'amplitude de la mise en charge (moyenne de tous les pics positifs), l'amplitude de la décharge (moyenne de tous les pics négatifs), mais aucun effet significatif n'a été observé pour la force moyenne, le déplacement du poids (nombre de pics/min) ou le rapport contra-latéral. Ces résultats contrastent avec ceux des chercheurs Sun *et al.*, 2011 ; Karriker *et al.*, 2013 ; Abell *et al.*, 2014 ; McNeil *et al.*, 2018 et de Conte *et al.*, 2014. Une première différence est que les recherches menées par Sun *et al.*, 2011 ; Karriker *et al.*, 2013 ; Abell *et al.*, 2014 ; McNeil *et al.*, 2018 ont toutes été réalisées chez des truies souffrant de boiterie synoviale induite chimiquement, tandis que les recherches de Conte *et al.* (2014) ont été réalisées chez des truies boiteuses d'origine naturelle.

Un autre facteur qui peut expliquer les différences entre ces études est que l'essai de Wedekind *et al.* (2019) portait sur des porcs charcutiers plus jeunes par opposition aux truies plus âgées utilisées par Sun *et al.* (2011), Karriker *et al.* (2013) ; Abell *et al.* (2014) ; McNeil *et al.* (2018) et Conte *et al.* (2014). Bien qu'une validation supplémentaire soit justifiée, nos conclusions suggèrent que certains des critères physiques objectifs mesurés sont suffisamment sensibles pour détecter les différences entre les porcs boiteux et non boiteux.

#### 2.6. Biomarqueurs sanguins

Les biomarqueurs sériques qui indiquent les taux de dégradation ou de renouvellement des tissus dans l'articulation se sont révélés prometteurs pour le diagnostic et le pronostic des affections articulaires en médecine humaine et vétérinaire (Garnero et Delmas, 2003 ; Garnero, 2006 ; Frisbie *et al.*, 2008 ; Williams et Spector, 2008 ; Felson et Lohmander, 2009).

Peu d'études portant sur le porc ont évalué l'intérêt de l'utilisation de biomarqueurs sériques du fonctionnement de l'os et du cartilage comme prédicteurs des boiteries. Dans l'étude conduite par Wedekind *et al.* (2015) sur la reproduction des cochettes et des truies atteintes de boiterie, le taux sérique d'ostéocalcine, qui est un biomarqueur de la synthèse osseuse, est significativement augmenté (+13 %) chez les cochettes et les truies recevant des CMHAM par rapport au groupe témoin recevant des minéraux inorganiques, ce qui correspond à une augmentation de 5 % des cendres osseuses. Plus important encore, ces augmentations de l'ostéocalcine et/ou des cendres osseuses ont été observées parallèlement à l'amélioration des scores de mobilité à la marche chez les cochettes et à la diminution du taux global de réforme et de celles pour des problèmes locomoteurs.

Frantz *et al.* (2010) ont évalué l'utilisation de biomarqueurs sériques de l'os et du cartilage pour prédire l'apparition de l'ostéochondrose et ont observé des niveaux élevés à la fois du C-propeptide du collagène de type II (CPII, une mesure de la synthèse du cartilage) et de la protéine de matrice oligomère du cartilage (COMP, une mesure de la dégradation du cartilage), et des niveaux réduits à la fois du télopeptide carboxy-terminal du collagène de type II (C2C, une mesure de la dégradation du cartilage) et des liaisons transversales de pyridinoline (PYD, une mesure du renouvellement des os) chez les porcs atteints d'OC (Tableau 1).

Le télopeptide réticulé du carboxy terminal du collagène de type II (CTXII) et la protéine de matrice oligomère du cartilage (COMP) sont des mesures de la dégradation du cartilage dont il a été démontré qu'elle augmentait avec l'augmentation de l'ostéochondrose (Tseng *et al.*, 2009) et des boiteries, comme chez les chevaux (Wedekind *et al.*, 2015), les rats (Wedekind *et al.*, 2015) et les humains (Dam *et al.*, 2009 ; van Spil *et al.*, 2010).

L'analyse de ces différents biomarqueurs comme indicateurs de boiterie n'est pas évidente en soi. Stavrakakis *et al.* (2016) ont observé des concentrations réduites de CPII et élevées de C2C chez les porcs présentant une rigidité de la démarche, donc en sens inverse de celui observé par Frantz *et al.* (2010). Une différence notable entre les essais de Frantz et de Stavrakakis *et al.* (2016) est que dans la première étude, les biomarqueurs ont été comparés aux scores de lésions d'OCD et non aux boiteries ; or, l'incidence des OCD n'est pas toujours corrélée

aux boiteries cliniques. En outre, les différences de réponse ou de sens de variation des biomarqueurs de dégradation ou renouvellement de l'os et des cartilages peuvent varier en fonction du stade d'aggravation des boiteries. Aux premiers stades de la MDA, les marqueurs de la synthèse du cartilage et/ou de l'os augmentent en réponse à une dégradation accrue du cartilage/de l'os. Cependant, aux stades plus avancés de la MDA, un taux de dégradation du cartilage plus élevé que la synthèse se produit en raison d'une activité catabolique excessive, de la perte de l'intégrité structurale de la matrice extracellulaire et d'un taux élevé d'apoptose, entraînant une diminution de la concentration de chondrocytes, qui à son tour, réduit la capacité à se réparer (Ayril *et al.*, 1996).

Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer l'utilité des biomarqueurs sériques des os et des cartilages pour prédire les boiteries chez les truies.

**Tableau 1.** Concentrations<sup>1</sup> sériques moyennes des biomarqueurs du renouvellement du cartilage et des os chez les porcs avec (n = 56) et sans (n = 15) signes évidents d'ostéochondrose (OCD) dans la partie distale de leur fémur gauche (Frantz *et al.*, 2010)<sup>1</sup>

Biomarqueur <sup>2</sup>	Concentration (tous porcs)		Signes d'OCD		Signification statistiques	
	Min	Max	Non	Oui	SED	Probabilité
<b>Synthèse Cartilage</b>						
CPII (ng/mL)	537,5	1.723,1.	648,1	1.110,5	85,06	<0,01
CS846 (ng/mL)	228,5	2.960,1	977,4	857,8	145,4	0,42
<b>Dégradation Cartilage</b>						
C2C (ng/mL)	60,1	202,9	163,0	123,9	10,42	<0,01
CTXII (pg/mL)	110,7	480,4	213,6	235,8	43,37	0,66
COMP (U/L)	0,51	2,16	1,05	1,39	0,101	<0,01
<b>Dégradation os</b>						
NTX (nM BCE)	100,0	411,0	215,3	234,9	21,61	0,37
ICTP (ug/L)	24,9	48,5	39,6	38,6	1,55	0,56
PYD (nmol/L)	4,5	9,8	8,1	6,6	0,38	<0,01
<b>Synthèse os</b>						
Osteocalcine (ng/mL)	11,5	34,8	22,2	23,6	1,03	0,20
BAP (U/L)	21,6	123,8	75,9	71,5	5,04	0,39

<sup>1</sup>Les échantillons de sang étaient prélevés par ponction veineuse avant l'abattage ; les échantillons de sérum ont été analysés au moyen de tests validés pour les porcs. La partie distale du fémur gauche de chaque porc a été examinée directement et après avoir été découpée en coupes longitudinales pour évaluer le nombre d'anomalies sur la surface externe, le cartilage articulaire, et la plaque de croissance.

<sup>2</sup>Abréviations : BCE = équivalent de collagène osseux. SED = Erreur type de la différence. U = Unités arbitraires. BAP : Alkaline phosphatase osseuse, C2C : Télopeptide carboxy-terminal de type II, COMP : protéine de matrice oligomère du cartilage, CPII C- : propeptide de type II collagen, CS846 : Chondroïtine sulfate epitope 846, CTXII : fragment télopeptidique réticulé carboxy-terminal de collagène type II, ICTP : Télopeptide carboxy-terminal réticulé de collagène de type I, NTX : Télopeptide amino-terminal de collagène type I, PYD : Pyridinoline/Pyridinoline

### 3. ROLE DE LA NUTRITION SUR LES BOITERIES

#### 3.1. Apport énergétique

Plusieurs auteurs considèrent qu'une croissance rapide des animaux augmente le risque d'OCD (Carlson *et al.*, 1988 ; van Grevenhof *et al.*, 2011 ; de Koning *et al.*, 2013 ; Quinn *et al.*, 2015). Cette croissance rapide peut résulter d'une consommation alimentaire plus importante ou d'une concentration énergétique (et nutritionnelle) plus élevée, sans qu'il soit toujours facile d'en dissocier les effets respectifs.

Jorgensen *et al.* (1995b) ont ainsi montré chez des porcs en croissance que le niveau d'apport énergétique affectait trois (sur quatorze) traits caractéristiques de faiblesse des pattes, ainsi que le score total de faiblesse de pattes. De plus, les porcs nourris à volonté présentaient des problèmes d'aplombs plus prononcés que les porcs restreints. Par contre, dans cette étude, le niveau d'apport énergétique n'a eu aucun effet sur l'ostéochondrose.

De Koning *et al.* (2013) ont évalué l'effet d'une alimentation rationnée (80 % de l'*ad libitum* ; AL) en fonction de l'âge, sur les lésions d'OCD chez les cochettes. Quatre régimes alimentaires ont été comparés : 1) alimentation rationnée du sevrage [4 semaines] à l'abattage [26 semaines] (RR) ; 2) restriction alimentaire aux premiers stades de la croissance uniquement (du sevrage à 10 semaines d'âge) suivie de l'alimentation AL jusqu'à l'abattage (RA) ; 3) alimentation AL du sevrage à 10 semaines suivie de l'alimentation rationnée jusqu'à l'abattage (AR) ; et 4) alimentation AL du sevrage à l'abattage (AA). Dans l'ensemble, l'ordre de prévalence de l'OCD chez les cochettes (des plus élevées aux plus faibles) était : RA, AA, AR et RR. Ces différences dans la prévalence d'OCD étaient associées au poids vif beaucoup plus élevé chez les femelles nourries AL pendant toute la durée de l'élevage ou après l'âge de 10 semaines. Chez le porc, l'intervalle d'âge entre 7 et 13 semaines est considéré comme la "fenêtre de sensibilité" à l'OCD (Ytrehus *et al.*, 2004). On peut penser que si la restriction alimentaire a lieu après cette fenêtre de sensibilité maximale, l'incidence de l'OCD sera réduite.

La conduite alimentaire des jeunes reproducteurs avec un aliment spécifique en quantité limitée, semble donc être une solution pour réduire les problèmes locomoteurs, mais en élevage elle est compliquée à mettre en œuvre et peut s'avérer coûteuse, comparé à la fourniture d'un aliment standard de gestation ou de lactation (Quinn *et al.*, 2013a).

### 3.2. Apports de Macro-nutriments

#### 3.2.1. Calcium et Phosphore

Rappelons que le calcium (Ca) et le phosphore (P) sont nécessaires pour le développement et le renouvellement de l'os. Pendant la gestation et la lactation, les besoins en calcium augmentent et les réserves de calcium des os peuvent être utilisées pour pallier un déficit, en particulier à la fin de la gestation et pendant la lactation. Les jeunes truies, qui sont encore en croissance, produisent beaucoup de lait tout en mangeant peu et présentent donc un risque majeur de déficit minéral. Il est important de raisonner les apports en calcium relativement aux apports en phosphore pour éviter tout risque de déficit et de bien caractériser les sources minérales (Quiniou *et al.*, 2019).

#### 3.2.2. Contenu en fibres

La conduite en groupe imposée par la directive européenne 2008/120/CE depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2013 a contribué à mettre en évidence un risque de boiteries plus important que dans les systèmes individuels du fait des interactions entre animaux qui conduisent à l'établissement d'établir une hiérarchie dans le groupe (Cador *et al.*, 2014), avec notamment le déroulement de bagarres, le comportement de fuite, (Quinn, 2013a) pouvant être source de glissades et blessures. Les aliments riches en fibre alloués à la truie en gestation génèrent une sensation de satiété permettant de réduire sa frustration, son manque de repos et son agressivité (Stewart *et al.*, 2008). Si ces aliments limitent les interactions négatives entre animaux en routine, il n'est pour autant pas certain qu'ils interfèrent avec les processus d'établissement de la hiérarchie qui interviennent sur une période relativement brève après le regroupement.

### 3.3. Oligo-éléments

#### 3.3.1. Rôle des oligo-éléments

Les oligo-éléments jouent un rôle important dans la formation des os et le maintien de l'intégrité du squelette (Underwood et Suttle, 1999). Le Zn et le Cu sont essentiels à la bonne formation du collagène, une protéine structurelle qui augmente la solidité des os (Underwood et Suttle, 1999). Alors que la synthèse du collagène est dépendante du Zn disponible, l'enzyme qui réticule les sous-unités du collagène en forme de protéines matures (lysyl oxydase) est dépendante du Cu (Rucker *et al.*, 1998). Le Mn joue également un rôle dans le développement des os, en particulier pour le développement de sa matrice protéoglycane (Fawcett, 1994).

Les oligo-éléments comme le Zn, le Mn et le Cu sont alors essentiels pour la santé du pied et le fonctionnement du système enzymatique et immunologique (Quinn, 2013b). L'ajout d'un complexe organique d'oligo-éléments chélatés avec du Zn, du Cu et du Mn à la ration des truies reproductrices diminue l'érosion du talon, son sur-développement et les lésions de la ligne blanche (Anil *et al.*, 2010 ; Bradley, 2010).

En pratique, les oligo-éléments sont souvent apportés à des niveaux qui dépassent de loin les exigences publiées dans les tables (NRC 2012 ; Gaudré et Quiniou, 2015), et ce même si un

institut tel que le NRC a augmenté ses niveaux de recommandations entre 1998 et 2012. Malgré des taux d'incorporation plus élevés que les recommandations, des problèmes structurels persistent, probablement en raison de la faible biodisponibilité des minéraux (Underwood et Suttle, 1999). Or, une alimentation avec des concentrations plus élevées de minéraux pour tenter de surmonter une faible biodisponibilité peut entraîner des déséquilibres ou des antagonismes entre eux et avec les autres nutriments (Underwood et Suttle, 1999).

L'Union européenne a récemment limité, dans les aliments complets, l'incorporation de Zn à 150 mg/kg chez les porcelets et les truies et 120 mg/kg chez les porcs à l'engrais (Règlement CE 2016/1095 de la Commission Européenne), et de Cu à 25 g/kg chez les porcs âgés de plus de 8 semaines (Règlement CE 2018/1039). L'utilisation de formes organiques d'oligo-éléments pourrait permettre de fournir plus de minéraux biodisponibles tout en limitant les risques d'antagonismes, offrant ainsi des avantages par rapport aux formes inorganiques (OEI). On a pu constater par exemple que le CMHAM (Zn, Mn et Cu) a permis de réduire de manière significative les défauts structurels (amélioration de la force et la largeur des os, amélioration du score du coussinet plantaire et réduction de l'incidence de la dyschondroplasie tibiale et de la synovite) chez des dindes nourries avec des aliments commerciaux (Dibner *et al.*, 2006, 2007 ; Ferket *et al.*, 2009) ou les boiteries des vaches laitières (Zhao *et al.* 2015). Contrairement aux conclusions de Frantz *et al.* (2008) et de Faba *et al.* (2018), Toth *et al.* (2016) n'ont constaté aucun effet bénéfique de l'utilisation d'OEO (Zn-Cu-Mn ; 50-10-20 mg/kg) fournis sous forme de complexes sur la prévalence ou la gravité des OCD chez les porcs. Mais cette absence d'effet peut être attribuée à l'absence d'OCD clinique observée pour tous les traitements à la semaine 24, malgré une incidence de 100% observée pour tous les traitements à la semaine 12.

#### 3.3.2. Réserves d'oligo-éléments chez les cochettes et les truies en fonction de la parité, de la productivité et de la source d'oligo-éléments.

Les besoins en oligo-éléments sont vraisemblablement accrus dans les lignées de truies maternelles actuelles à forte prolificité. Selon l'étude de Mahan et Newton (1995) les réserves minérales corporelles (Ca, P, Mg, K, Na, Al, Zn, and Cu) des truies s'épuisent progressivement sur une période de trois parités et les pertes de minéraux corporels (Ca, P, Zn) sont plus importantes chez les truies très productives (total des poids de portée au sevrage sur les 3 premières portées > 60kg) que chez celles qui le sont moins. Peters et Mahan (2008) ont comparé l'apport d'OEO (fournis sous forme de protéinates) à un apport d'OEI sur les performances de reproduction. Les truies nourries avec des OEO ont significativement mis bas plus de porcelets au total (12,2 contre 11,3) et plus de porcelets vivants (11,3 contre 10,6). Elles ont eu des portées plus lourdes à la naissance avec par la suite une tendance à un GMQ plus important des porcelets pendant la lactation. Ces auteurs soulignaient que l'apport journalier en oligo-éléments aux truies en lactation était réduit (exprimé en quantité/kg de poids corporel) lorsque leur parité augmentait de 1 à 6, ce qui suggère que l'apport en oligo-éléments chez les truies plus âgées en lactation pourrait être insuffisant pour couvrir les besoins de la progéniture et le maintien de l'organisme. Cependant, aucune mesure osseuse n'a été évaluée dans cet essai. Une étude ultérieure de la même équipe (Peters *et al.*, 2010) a conclu que la nature de la source d'oligo-éléments dans l'aliment influençait peu les teneurs

corporelles et hépatiques en minéraux, alors qu'ils observaient une augmentation du Cu, du sélénium (Se) et du Zn chez les truies ayant reçu une plus grande quantité d'oligo-éléments (niveau pratiqué dans l'industrie vs recommandations NRC). Crenshaw *et al.* (2013) ont prélevé des échantillons de tissus chez 66 truies hyperprolifériques (moyenne de 12,9 porcs nés vivants par portée) avec une parité de 0 à 7 et ont analysé les concentrations en oligo-éléments (Zn, Cu, Mn, Fe), ainsi que celles de Ca, de P et de cendres osseuses. Contrairement aux conclusions de Mahan et Newton (1995), il n'y a pas eu de réduction des concentrations de minéraux en fonction de l'âge. L'une des limites de cette dernière étude était l'absence de comparaison entre les réserves corporelles d'oligo-éléments chez les cochettes et les truies abattues prématurément en raison d'une boiterie et/ou de mauvaises performances de reproduction.

### 3.3.3. Efficacité des oligo-éléments chélatés sur les taux de réformes et les problèmes de locomotion

De nombreux essais (Tableau 2) ont démontré les avantages des oligo-éléments chélatés par rapport à d'autres OEO ou OEI sur diverses mesures des boiteries chez plusieurs espèces.

Aux États-Unis, deux fermes de 6.400 truies chacune ont été alimentées avec des aliments contenant un mélange OEI ou 50/50 OEI/CMHAM pendant environ 3 ans. Les concentrations totales de Zn-Cu-Mn étaient respectivement de 165-20-40 mg/kg d'aliment (Wedekind *et al.*, 2015). Les traitements ont été appliqués dès le sevrage jusqu'à l'entrée en maternité. Les truies ont reçu le même traitement jusqu'à l'abattage. Le pourcentage de truies atteignant la parité 3, les causes de réforme, les caractéristiques de reproduction, la mortalité, le score de mobilité des cochettes, les teneurs en ostéocalcine sérique et les cendres osseuses ont été mesurées.

**Tableau 2.** Effets des formes chélatées d'hydroxy analogue de méthionine d'oligo-éléments (CMHAM) en comparaison aux formes inorganiques (OEI) ou à d'autres sources organiques (OEO) sur les boiteries, l'intégrité structurelle, la longévité, l'inflammation et la mortalité chez de nombreuses espèces

Espèce	Bénéfices	Sens de variation	CMHAM	OEI	OEO	P-value	Référence		
Dindes	Synovite, %	↓	10,9	19,6		<0,05	Dibner <i>et al.</i> (2006)		
	Dyschondroplasie du tibia, %	↓	17,1	34,9		<0,05			
	Score pododermatite <sup>1</sup>	↓	0,82	1,33	-	<0,05			
	Force de rupture des os, kg	↑	100	80		<0,05			
	Largeur corticale, mm	↑	1,6	1,4		<0,10			
	Cendres de Tibia, %	↑	55,3	53,8		<0,05			
Dindes	Varus valgus jambe tremblante %	↓	14,1	21,7	-	0,008	Ferket <i>et al.</i> (2009)		
	Diamètre des os, mm	↑	2,2	1,9		0,001			
Truies/ cochettes	Réforme due à la locomotion, %	↓	14,8 <sup>a</sup>	18,6 <sup>b</sup>	14,9 <sup>a</sup>	<0,01	Barea <i>et al.</i> (2019)		
	Mortalité, %	↓	7,2 <sup>a</sup>	8,5 <sup>c</sup>	7,7 <sup>b</sup>	<0,01			
	Truies restant jusqu'au rang 3, %	↑	73,9 <sup>c</sup>	67,2 <sup>a</sup>	70,7 <sup>b</sup>	<0,01			
Truies/ cochettes	Réforme due à la locomotion, %	↓	10,4	16,1		<0,001	Wedekind <i>et al.</i> (2015)		
	Mortalité, %	↓	8,6	10,4		0,08			
	Truies restant jusqu'au rang 3, %	↑	82,2	77,7	-	<0,01			
	Cendres osseuses, %	↑	32,8	31,1		<0,01			
	Ostéocalcine, ng/mL <sup>2</sup>	↑	132,8	117,6		<0,05			
	Score mobilité <sup>3</sup>	↑	7,2	10,5		0,004			
Vaches laitières	Animaux		Sains	Boiteux	Sains	Boiteux	Zhao <i>et al.</i> (2015)		
	Boiterie score <sup>4</sup> 1-2, n		12	5	10	1			
	Boiterie score <sup>4</sup> 3-5, n		0	7	2	11			
	COMP, ng/mL <sup>2</sup>	↓	69,2	73,8	88,6	93,1		-	<0,10
	CTXII, ng/mL <sup>2</sup>	↓	106,5 <sup>a</sup>	113,1 <sup>b</sup>	139,7 <sup>b</sup>	142,7 <sup>b</sup>			<0,05
	Dureté sabot <sup>5</sup>	↑	33,5 <sup>c</sup>	32,7 <sup>c</sup>	30,0 <sup>b</sup>	27,9 <sup>a</sup>			0,001
MDA, nmol/mL <sup>2</sup>	↓	3,7 <sup>a</sup>	4,0 <sup>a</sup>	4,4 <sup>b</sup>	5,6 <sup>c</sup>		0,007		

<sup>1</sup> Score de pododermatite (0-4 ; 4 = sévère).

<sup>2</sup> COMP = protéine de matrice oligomère du cartilage ; CTXII = fragment télopeptidique réticulé carboxy-terminal de collagène type II ; marqueurs de dégradation du cartilage. L'ostéocalcine est un biomarqueur de la synthèse des os ; MDA = malondialdéhyde ; biomarqueur inflammatoire.

<sup>3</sup> Une échelle de mobilité de la démarche de 0 à 12 a été évaluée pour chaque jambe ; 0 représente une santé normale, 12 une boiterie sévère.

<sup>4</sup> Chaque traitement était composé de deux groupes sain ou légèrement boiteux = (score 1<sup>e</sup> et 2) vs boiteux (scores 3 à 5). Au début, le groupe en bonne santé commençait avec 12 animaux ayant un score de 1 ou 2, alors que les groupes boiteux contenaient 12 animaux avec des scores de 3 à 5.

<sup>5</sup> La dureté du sabot a été mesurée avec un duromètre ; les unités vont de 0 à 100 ; un chiffre plus élevé indique une augmentation de dureté.

Dans cette étude, le taux de réforme des cochettes a été réduit de 8,8% à 8,0% ( $P = 0,04$ ) avec la supplémentation en CMHAM par rapport au témoin (OEI). Une réduction du taux relatif de réforme dû à des problèmes de locomotion (9,0% contre 13,8%,  $P < 0,001$ ) a été observée chez les cochettes nourries au CMHAM vs OEI. De même, une réduction de la mortalité a été observée pour les cochettes nourries au CMHAM par rapport au témoin (1,5% contre 2,1%,  $P = 0,001$ ).

Dans une sous-population de cochettes ( $n = 65$ ), le score de mobilité totale et l'ostéocalcine plasmatique ont été mesurés. Le score de mobilité était évalué sur une échelle de 0 à 12 pour chaque jambe ; 0 représente un état de santé normal, 12 une boiterie grave. Les cochettes nourries au CMHAM ont obtenu un score de 7,2 contre 10,5 pour les cochettes nourries à l'OEI ( $P = 0,004$ ). L'ostéocalcine plasmatique était plus élevée chez les cochettes nourries au CMHAM que chez celles recevant des OEI

(30,0 contre 28,8 ng/mL,  $P < 0,001$ ). L'augmentation de l'ostéocalcine plasmatique avec la CMHAM a également été observée chez les cochettes de remplacement. Comme le montre le tableau 3, l'ostéocalcine plasmatique et les cendres osseuses ont été significativement augmentées par la parité, ainsi que par la source d'oligo-éléments, des concentrations plus élevées étant observées chez les cochettes/truies nourries au CMHAM.

Pour les truies de rangs de portée 1 à 4, la réduction du taux de réforme avec le CMHAM par rapport au contrôle était de 23,6%

(27,9% contre 36,5%, respectivement,  $P < 0,001$ ). De plus, les truies du lot CMHAM avaient un taux de réforme relatif plus faible pour des problèmes de locomotion en comparaison du groupe témoin (10,4% contre 16,1%, respectivement,  $P < 0,001$ ). En outre, la mortalité était respectivement de 8,6% et 10,4% pour les truies des traitements CMHAM et OEI ( $P = 0,08$ ). Le taux de conservation des truies (jusqu'à la parité 3) a augmenté de 6% pour le CMHAM par rapport à OEI (82,2% et 77,7%, respectivement,  $P < 0,01$ ).

**Tableau 3.** Effet de la source d'oligo-éléments<sup>1</sup> et de la parité sur le poids vif, le marqueur sanguin et le contenu en cendres des os des cochettes et truies (Wedekind *et al.*, 2015)

	OEI <sup>1</sup> n = 223	CMHAM n = 191	Parité				Probabilité <sup>2</sup>			
			0	1+2	3+4	≥5	ETR <sup>2</sup>	Lot	Parité	Interaction
Poids vif, kg	173,9	192,3	135,7	183,4	196,4	216,7	2,5	<0,01	<0,01	0,49
Ostéocalcine, ng/ml	117,6	132,8	39,9	187,6	152,3	120,8	6,8	0,04	<0,01	0,49
Cendres des os, %	31,1	32,8	27,9	31,5	34,0	34,4	0,77	<0,01	<0,01	0,12

<sup>1</sup>OEI : oligoéléments inorganiques (165 ppm Zn-20 ppm Cu-40 ppm Mn apportés sous forme inorganique), CMHAM : 165 ppm Zn-20 ppm Cu-40 ppm Zn apportés à 50/50 entre chélates de métaux et d'hydroxy-analogue de méthionine et inorganiques

<sup>2</sup>ETR : écart-type résiduel

Dans une autre étude conduite en Espagne (Barea *et al.*, 2019), quatre-vingt-deux exploitations comptant 125.650 truies au total ont reçu pendant 2 ans l'une des trois sources d'oligo-éléments suivantes : 1) OEI (100 mg/kg Zn (ZnO), 25 mg/kg Cu (CuSO<sub>4</sub>) et 45 mg/kg Mn (MnO), 2) OEO (50% OEI) : 50% OEO; niveau total équivalent au traitement 1 ; OEO fourni sous forme de complexes d'acides aminés ou de protéinates, ou 3) CMHAM (50 mg/kg Zn, 10 mg/kg Cu, et 20 mg/kg Mn), tous fournis sous forme de Zn-Cu-Mn chélatés à l'hydroxy analogue de méthionine. Les taux de réforme dus à des problèmes de locomotion étaient respectivement de 18,6%, 14,9% et 14,99% pour les traitements OEI, OEO et CMHAM, ce qui représente une réduction de 20% pour OEO et CMHAM par rapport à OEI (aucune différence significative entre OEO et CMHAM n'a été observée pour ce critère). Le taux de mortalité des truies a également diminué : 8,55%, 7,77% et 7,20%, respectivement ; ce qui représente une réduction de 9% pour OEO et de 15% pour la CMHAM par rapport à OEI et de 6% pour CMHAM par rapport à OEO ( $P < 0,01$ ). Le traitement CMHAM a également amélioré un certain nombre de critères de la reproduction, notamment il a augmenté le taux de mise bas et a diminué le taux de renouvellement ( $P < 0,01$ ). Les taux de conservation des truies jusqu'à la parité 3 étaient respectivement de 67,2%, 70,7% et 73,9% pour les traitements OEI, OEO et CMHAM ( $P < 0,01$ ), ce qui représente une augmentation de 5% et 10% pour OEO et CMHAM, par rapport au témoin OEI. D'autres études ont également démontré une réduction des boiteries chez les truies supplémentées avec des OEO (Anil *et al.*, 2009b ; 2010)

### 3.3.4. Efficacité des oligo-éléments sur la dureté et les lésions des onglons.

Les avantages des OEO sur la santé des onglons ont été démontrés par Lisgara *et al.* (2016) et Varagka *et al.* (2016). Dans ces deux études, du Zn, du Cu et du Mn (45, 14 et 25 mg/kg, respectivement, fournis sous forme de complexes organiques) ont été ajoutés en remplacement partiel des 125, 15 et 40 mg/kg de Zn, Cu et Mn au total, fournis sous forme de ZnO, CuSO<sub>4</sub> et MnO. Les améliorations de la santé des onglons observées avec l'OEO comprenaient des scores de lésions plus faibles ainsi que des améliorations concernant le diamètre inférieur des tubules de la corne, une plus grande densité de la corne et une réduction des fourbures.

Le CMHAM a également été efficace pour réduire les boiteries et augmenter la dureté des sabots des vaches laitières (Bach *et al.*, 2015 ; Zhao *et al.*, 2015.) comme montré dans le tableau 2. Zhao et al 2015 ont montré que ces améliorations sont allées de pair avec une réduction des biomarqueurs de dégradation du cartilage sérique (le CMHAM a réduit à la fois le télopeptide réticulé du carboxy-terminal du collagène de type II (CTXII ;  $P < 0,05$ ) et la protéine de matrice oligomère du cartilage COMP ( $P < 0,10$ ) par rapport aux vaches ayant reçu des suppléments inorganiques.

### 3.4. Influence des acides aminés seuls ou en combinaison avec des oligo-éléments sur l'incidence de l'OCD et des boiteries chez le porc

La méthionine, en tant que source de soufre, peut favoriser la différenciation des ostéoblastes et augmenter l'ostéocalcine (Ouattara *et al.*, 2016), et serait donc bénéfique pour la formation du collagène et des os.

Frantz *et al.* (2008) ont évalué les effets de divers ingrédients/nutriments alimentaires, notamment les acides aminés (Met, Thr, Pro, Gly, Leu, Ile, Val) et les oligo-éléments (Silice, Cu/Mn) sur l'apparition d'OCD. Une réduction du score de gravité de l'OCD a été observée chez les porcs recevant des régimes très enrichis en méthionine (ratio de 150% par rapport à Lys) ou en thréonine (100% / Lys) ainsi qu'en Silice, en Cu et Mn.

Faba *et al.* (2018) ont évalué l'effet des minéraux organiques et de la méthionine sur les boiteries chez les cochettes. Quatre traitements alimentaires ont été comparés : 1) régime témoin (CON), 2) oligo-éléments organiques (50-10-20 mg/kg Zn-Cu-Mn, le type d'oligo-éléments organiques est non spécifié (OEO) et 3) Met (hydroxy-analogue de méthionine) ; (102 % Met/Lys) (MET) et 4) Met + OEO (MM). Les régimes ont été distribués aux cochettes pendant la période d'élevage. Les cochettes ont été évaluées pour les boiteries au début et à la fin de la gestation et au sevrage. La santé des onglons a également été mesurée durant la phase de lactation. Les réformes pour causes de boiteries s'élevaient à 12,3 %, soit 9 fois plus chez les cochettes que chez les truies de première parité. La prévalence globale de boiteries (Tableau 4) entre 29 et 155 kg était de 7,75%. Un pourcentage plus important de cochettes nourries avec le régime témoin étaient boiteuses par rapport à OEO, la MET ou



MM. De même, pendant la période de lactation/sevrage, un pourcentage plus élevé de cochettes nourries avec le traitement CON étaient boiteuses, sans différence entre OEO,

MET et MM. On a constaté une tendance à la hausse des lésions des onglons chez les cochettes recevant les aliments CON et MET.

**Tableau 4.** Effet du traitement<sup>1</sup> sur les taux de boiteries et de lésions des onglons selon le stade chez des cochettes suivies de 134 jours d'âge jusqu'à la mise-bas (Faba *et al.*, 2018)

	CON	OEO	MET	MM	Probabilité
Animaux, n	64	61	62	63	
Boiteries <sup>2</sup> , %					
Croissance/finition	14,8 <sup>b</sup>	2,0 <sup>a</sup>	5,3 <sup>a</sup>	6,4 <sup>a</sup>	0,006
Début de gestation	10,9	10,1	11,3	10,9	0,994
Fin de gestation	11,8	6,8	7,6	7,6	0,530
Lactation/sevrage	20,8 <sup>b</sup>	6,5 <sup>a</sup>	11,1 <sup>a</sup>	7,6 <sup>a</sup>	0,010
Lésions sévères des onglons, %	54,5	19,6	60,9	27,3	0,089

<sup>1</sup>CON : régime témoin, OEO : oligo-éléments organiques (50-10-20 mg/kg Zn-Cu-Mn, type de OEO non spécifié), MET : Hydroxy-analogue de Méthionine (102 % Met:Lys) et MM : Met + OEO.

<sup>2</sup>Les boiteries ont été évaluées selon le score de trois points - Faba *et al* (2018)

### 3.5. Efficacité des vitamines sur la santé des onglons

L'apport vitaminique (en particulier A, C, D et biotine) joue un rôle important sur la santé des pattes dans sa structure osseuse en particulier (van Riet *et al.*, 2013). En ce qui concerne les onglons, les résultats concernant l'impact de la biotine chez les vaches laitières et les truies, sont mitigés. Chez les truies, Greer *et al.* (1991) ont observé une réduction significative des lésions du pied de 55% à 42%, tandis que Watkins *et al.* (1991) n'ont trouvé aucun effet de la biotine sur les lésions ou la santé du pied. Simmins et Brooks, (1988) montrent que si la biotine réduit globalement le taux de lésions des onglons des truies, elle ne permet pas de mettre en évidence une amélioration sur une lésion en particulier. Une méta-analyse a évalué l'efficacité d'une supplémentation en biotine sur le rendement laitier et la santé des sabots dans les élevages laitiers (Lean et Rabiee, 2011). La biotine a permis de montrer une amélioration de la santé des sabots, dans 8 publications sur 12 sélectionnées pour ce critère.

## CONCLUSION

Les boiteries sont une problématique multi espèces et ont des conséquences importantes, autant sur l'économie de la production que sur le bien-être animal.

Si les causes sont relativement bien identifiées, les moyens de mesures et de prédire ces boiteries sont encore perfectibles. Au-delà des mesures subjectives, les biomarqueurs sanguins semblent être des techniques prometteuses pour la prédiction et le diagnostic des phénomènes de dégradation et développement du cartilage et de l'os.

Chez la truie, la restriction alimentaire ou énergétique des jeunes reproducteurs, dans l'objectif de ralentir la croissance,

peut constituer une stratégie nutritionnelle efficace pour réduire les boiteries, mais cette stratégie peut s'avérer complexe et coûteuse à mettre en œuvre. De plus d'un point de vue sociétal, la restriction alimentaire peut être critiquable du fait de la compétition accrue qu'elle peut induire entre les animaux.

Parmi les autres pistes nutritionnelles, la piste des oligo-éléments est la plus prometteuse. Mais apporter des teneurs plus élevées en minéraux inorganiques n'est pas la solution, car l'incidence et la gravité des boiteries persistent malgré des teneurs plus élevées en minéraux, et la réglementation va pousser à encore plus à les restreindre pour limiter leur impact sur l'environnement. L'utilisation des oligo-éléments organiques semble être la solution nutritionnelle la plus cohérente pour réduire les boiteries. Comme le montre cette synthèse, la réduction des boiteries grâce aux chélates d'oligoéléments a été démontrée chez les porcs mais aussi chez d'autres espèces (volailles, vaches laitières) et a eu des effets bénéfiques sur la santé des pattes (onglons, sabots ou coussinets de pied chez les volailles), les difformités angulaires (valgus, varus), les biomarqueurs sériques, l'épaisseur des os, la cendre osseuse, la résistance à la rupture des os et la réduction des OCD, de la dystrophie tibiale, de la synovite, les scores de boiteries et les taux de réforme.

L'utilisation d'oligo-éléments plus biodisponibles est bénéfique pour la reproduction, la santé du squelette et des articulations des truies de production et peut apporter des avantages importants à la gestion et à l'économie de l'exploitation par une meilleure gestion des taux de réforme et de renouvellement. Cela contribue également à l'amélioration du bien-être des animaux et à l'environnement.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aasmundstad T., Dongsro J., Wetten M., Dolvik N.I., Vangen O., 2013. Osteochondrosis in pigs diagnosed with computed tomography: Heritabilities and genetic correlations to weight gain in specific age intervals. *Animal*, 7, 1576-1582.
- Abell C.E., Johnson A.K., Karriker L.A., Rothschild M.F., Hoff S.J., Sun G., Fitzgerald R.F., Stalder K.J., 2014. Using classification trees to detect induced sow lameness with a transient model. *Animal*, 8, 1000-1009.
- Anil S.S., Anil L., Deen J., Baidoo S.K., Walker R.D., 2007. Factors associated with claw lesions in gestating sows. *J Swine Health Prod*, 15, 78-83.
- Anil S., Anil L., Deen J., 2009a. Effect of lameness on sow longevity. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 235, 734-738.
- Anil S.S., Deen J., Anil L., Baidoo S.K., Wilson M.E., Ward T.L., 2009b. Evaluation of the supplementation of complexed trace minerals on the number of claw lesions in breeding sows. *Manipulating Pig Production XII. Australia, 12th Biennial Conference of the Australasian Pig Science Association*, pp 108.
- Anil S.S., Anil L., Deen J., Baidoo S.K., Wilson M.E., Ward T.L., 2010. Evaluation of the effect of supplementing complex trace minerals on the development of claw lesions in stall-housed sows. *J. Anim. Sci.*, 88, Suppl 2, 827.

- Ayrat X., Dougados M., Listrat V., Bonvarlet J.P., Simonnet J., Amor B., 1996. Arthroscopic evaluation of chondropathy in osteoarthritis of the knee. *J. Rheumatol.*, 23, 698-706.
- Bach A., Pinto A., Blanch M., 2015. Association between chelated trace mineral supplementation and milk yield, reproductive performance, and lameness in dairy cattle. *Livest. Sci.*, 182, 69-75.
- Barea R., Bourdonnais A., Yague A.P., 2019. Utilisation d'oligo-éléments organiques dans l'alimentation des truies : effets sur la longévité et les performances des portées. *Journées Rech. Porcine*, 51, 167-168.
- Bertholle C.P., Meijer E., Back W., Stegeman A., van Weeren P.R., van Nes A., 2016. A longitudinal study on the performance of in vivo methods to determine the osteochondrotic status of young pigs. *BMC Vet. Res.*, 12, 62.
- Billingham R.C., Brama P.A.J., van Weeren P.R., Knowlton M.S., McIlwraith C.W., 2004. Evaluation of serum concentrations of biomarkers of skeletal metabolism and results of radiography as indicators of severity of osteochondrosis in foals. *Am. J. Vet. Res.*, 65, 143-150.
- Blackie N., Bleach E., Amory J., Scaife J., 2011. Impact of lameness on gait characteristics and lying behavior of zero grazed dairy cattle in early lactation. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 129, 67-73.
- Bonde M., Rousing T., Badsberg J.H., Sorensen J.T., 2004. Associations between lying-down behavior problems and body condition, limb disorders and skin lesions of lactating sows housed in farrowing crates in commercial sow farms. *Livest. Prod. Sci.*, 87, 179-187.
- Borderas T.F., Pawluczuk B., de Passille A.M., Rushen J., 2004. Claw hardness of dairy cows: relationship to water content and claw lesions. *J. Dairy Sci.*, 87, 2085-2093.
- Bradley C.L., 2010. Evaluating the impact of dietary inorganic or organic trace mineral supplementation on gilt development and sow reproduction, lameness, and longevity. PhD Diss. Univ. Arkansas, Fayetteville. p. 1-398
- Cadot C., Pol F., Hamoniaux M., Dorenlor V., Eveno E., Guyomarc'h C., Rose N. 2014. Étude des troubles locomoteurs chez la truie gestante logée en groupe. *Journées Rech. Porcine*, 46, 261-266.
- Carlson C.S., Hillel H.D., Meuten D.J., Hagan J.M., Moser R.L., 1988. Effect of reduced growth rate on the prevalence and severity of osteochondrosis. *J. Orthop. Res.*, 9, 317-329.
- Conte S., Bergeron R., Gonyou H., Brown J., Rioja- Lang R., Connor L., Devillers N., 2014. Measure and characterization of lameness in gestating sows using force plate, kinematic, and accelerometer methods. *J. Anim. Sci.*, 92, 5693-5703.
- Crenshaw T.D., Schneider D.K., Carlson C.S., Parker J.B., Sonderman J.P., Ward T.L., Wilson M.E., 2013. Tissue mineral concentrations and osteochondrosis lesions in prolific sows across parities 0 through 7. *J. Anim. Sci.*, 91, 1255-1269.
- Dam E.B., Byrjalsen I., Karsdal M.A., 2009. Increased urinary excretion of C-telopeptides of type II collagen (CTX-II) predicts cartilage loss over 21 months by MRI. *Osteoarthr. Cartil.*, 17, 384-389.
- d'Eath R.B., 2012. Repeated locomotion scoring of a sow herd to measure lameness: consistency over time, the effect of sow characteristics and inter-observer reliability. *Anim. Welfare*, 21, 219-231.
- Deen J., Anil S.S., Anil L., 2007. Claw lesions as a predictor of lameness in breeding sows. Proc. of the 58th Annual Meeting of the European Association of Animal Production, (AAP 07), Dublin, Ireland, 274.
- Deen J., Anil S.S., Anil L., Baidoo S., 2008. Lameness overview and awareness: implications for welfare, housing, performance and economics. FeetFirst™ Symposium on Sow Lameness, Asten/Sterksel, The Netherlands, pp 4.
- 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, 4752-4763.
- 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, 5167-5176.
- Dewey C.E., Friendship R.M., Wilson M.R., 1993. Clinical and postmortem examination of sows culled for lameness. *Canadian Veterinary Journal*, 34, 555-556.
- Dibner J.J., Quiroz M.L.M., Richards J.D., 2006. Benefit of MINTREX P blend of organic trace minerals on tibial dyschondroplasia, synovitis and pododermatitis in heavy weight tom turkeys. [abstract] Poultry Science Edmonton, Alb. July 16-19.
- Dibner J.J., Richards J.D., Kitchell M.L., 2007. Metabolic challenges and early bone development. *J. Appl. Poultry Res.*, 16, 126-137.
- Dik K.J., Enzerink E., van Weeren P.R., 1999. Radiographic development of osteochondral abnormalities, in the hock and stifle of Dutch Warmblood foals, from age 1 to 11 months. *Equine Vet. J. Suppl.*, 31, 9-15.
- Espejo L.A., Endres M.I., Salfer J.A., 2006. Prevalence of lameness in high producing dairy cows housed in freestall barns in Minnesota. *J. Dairy Sci.*, 89, 3052-3058.
- Etterlin P.E., Morrison D.A., Osterberg J., Ytrehus B., Heldmer E., Ekman S., 2015. Osteochondrosis, but not lameness, is more frequent among free-range pigs than confined herd-mates. *Acta Vet. Scand.*, 57:63.
- Etterlin P.E., Ytrehus B., Lundeheim N., Heldmer E., Osterberg J., Ek S., 2014. Effects of free-range and confined housing on joint health in a herd of fattening pigs. *BMC Vet. Res.*, 10, 208.
- Faba L., Gasa J., Tokach M.D., Varella E., Sola-Oriol D., 2018. Effects of supplementing organic microminerals and methionine during the rearing phase of replacement gilts on lameness, growth, and body composition. *J. Anim. Sci.*, 96, 3274-3287.
- Felson D.T., Lohmander L.S., 2009. Whither osteoarthritis biomarkers? *Osteoarthr. Cartil.*, 17, 419-422.
- Fawcett D.W. 1994. Bone. In: Bloom and Fawcett: A textbook of histology. Chapman & Hall, New York. pages
- Ferket, P.R., Oviedo-Rondon E.O., Mente P.L., 2009. Organic trace minerals and 25-hydroxycholecalciferol affect performance characteristics, leg abnormalities and biomechanical properties of leg bones of turkeys. *Poultry Sci.*, 88, 118-131.
- Fitzgerald R.F., Stalder K.J., Karriker L.A., Sadler L.J., Hill H.T., Kaisand J., Johnson A.K., 2012. The effect of hoof abnormalities on sow behavior and performance. *Livest. Sci.*, 145, 230-238.
- Frantz N.Z., Andrews G.A., Tokach M.D., Nelssen J.L., Goodband R.D., Derouchey J.M., Dritz S.S., 2008. Effect of dietary nutrients on osteochondrosis lesions and cartilage properties in pigs. *Am. J. Vet. Res.*, 69, 617-624.
- Frantz NZ, Friesen KG, Andrews GA, Tokach MD, Yamka RM, Loughin TL, Nelssen JL, Dritz SS, 2010. Use of serum biomarkers to predict the development and severity of osteochondrosis lesions in the distal portion of the femur in pigs. *Am. J. Vet. Res.*, 71, 946-952.
- Frisbie DD, Al-Sobayil F, Billingham R.C., *et al.*, 2008. Changes in synovial fluid and serum biomarkers with exercise and early osteoarthritis in horses. *Osteoarthritis Cartilage*, 16, 1196-1204.
- Garner P., 2006. Use of biochemical markers to study and follow patients with osteoarthritis. *Curr. Rheumatology Rep.*, 8, 37-44.
- Garner P., Delmas P.D., 2003. Biomarkers in osteoarthritis. *Curr. Opin. Rheumatology*, 15, 641-646.
- Gaudré D., Quiniou N., 2015. What mineral and vitamin levels to recommend in swine diets? *Les cahiers de l'IFIP*, 2, 49-59.
- Gjein H., Larssen R.B., 1995. Housing of pregnant sows in loose and confined systems—a field study. 2. Claw lesions: morphology, prevalence, location and relation to age. *Acta Vet. Scand.*, 36, 433-442.

- Grandjot G., 2007. Claw problems cost money SUS-Schweinezucht und Schweinemast Landwirtschaftsverlag GmbH. Munster-Hiltrup, Germany, 5, 28-31.
- Greer E.B., Leibholz J.M., Pickering D.I., Macoun R.E., Bryden W.L., 1991. Effect of supplementary biotin on the reproductive performance, body condition and foot health of sows on three farms. *Aust. J. Agric. Res.*, 42, 1013-21.
- Grégoire J., Bergeron R., D’Allaire S., Meunier-Salaün M.-C., Devillers N., 2013. Assessment of lameness in sows using gait, footprints, postural behavior and foot lesion analysis. *Animal*, 7, 1163-1173.
- Grondalen T., 1974. Osteochondrosis and arthrosis in pigs. II. Incidence in breeding animals. *Acta Vet. Scand.*, 15, 26-42.
- Hamoniaux M., Caille M.-E., Guyomarc’h C., 2014. Prévalence et évolution des boiteries et lésions aux onglons chez les truies en groupes dans cinq élevages bretons. *Journ Rech Porcine*, 46, 269-270
- Heinonen M., Oravainen J., Orro T., Seppa-Lassila L., Ala-Kurikka E., Virolainen J., Tast A., Peltoniemi O.A.T., 2006. Lameness and fertility of sows and gilts in randomly selected loose-housed farms in Finland. *The Vet. Rec.*, 159, 383-387.
- Johnson R.W., 1997. Inhibition of growth by proinflammatory cytokines: an integrated view. *J. Anim. Sci.*, 75, 1244-1255.
- Jorgensen B., Arnbjerg J., Aaslyng M., 1995a. Pathological and radiological investigations on osteochondrosis in pigs, associated with leg weakness. *J. Vet. Med. A.*, 42, 489-504.
- Jorgensen B., 1995b. Effect of different energy and protein levels on leg weakness and osteochondrosis in pigs. *Livest. Prod. Sci.* 41, 171-181
- Karriker L.A., Abell C.E., Pairis M.D., Holt W.A., Sun G., Coetzee J.F., Johnson A.K., Hoff S.J., Stalder K.J., 2013. Validation of a lameness model in sows using physiological and mechanical measurements. *J. Anim. Sci.*, 91, 130-136.
- Lean I.J., Rabiee A.R., 2011. Effect of feeding biotin on milk production and hoof health in lactating dairy cows: A quantitative assessment. *J. Dairy Sci.*, 94, 1465-1476.
- Lisgara M., Skampardonis V., Leontides L., 2016. Effect of diet supplementation with chelated zinc, copper and manganese on hoof lesions of loose housed sows. *Porcine Health Management*, 2, 1-9.
- Lucia T., Dial G.D., Marsh W.E., 2000. Lifetime reproduction performance in female pigs having distinct reasons for removal. *Livest. Prod. Sci.*, 63, 213- 222.
- Marcon M., Courboulay V., 2017. Système d’alerte : peut-on prédire les boiteries des truies gestantes ? *TechPorc*, 38, 20-21.
- Mahan D.C., Newton E.A., 1995. Effect of initial breeding weight on macro- and micromineral composition over a three-parity period using a high-producing sow genotype. *J. Anim. Sci.*, 73, 151-158.
- Main D.C.J., Clegg J., Spatz A., Green L.E., 2000. Repeatability of a lameness scoring system for finishing pigs. *Vet. Rec.*, 147, 574-576.
- McCoy A.M., Toth F., Dolvik N.I., Ekman S., Ellermann J., Olstad K., Ytrehus B., Carlson C.S., 2013. Articular osteochondrosis: A comparison of naturally-occurring human and animal disease. *Osteoarthritis Cartilage*, 21(11):10.1016/j.joca.2013.08.011.
- McNeil B., Calderon Diaz J., Bruns C., Stock J., Millman S., Johnson A., Karriker L., Stalder K., 2018. Determining the time required to detect induced sow lameness using an embedded microcomputer-based force plate system. *Am. J. Anim. Vet. Sci.*, 13, 59-65.
- Mohling C.M., Johnson A.K., Coetzee J.F., Karriker L.A., Abell C.E., 2014. Kinematics as objective tools to evaluate lameness phases in multiparous sows. *Livest. Sci.*, 165, 120-128.
- 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. Nutrient Requirements of Swine, Tenth Revised Edition, 1998. National Academy Press, Washington, D.C. nb pages
- NRC. Nutrient Requirements of Swine, Eleventh revised edition, 2012. National Academy Press, Washington, D.C. nb pages
- Olstad K., Kongsro J., Grindflek E., Dolvik N.I., 2014. Consequences of the natural course of articular osteochondrosis in pigs for the suitability of computed tomography as a screening tool. *BMC Vet. Res.*, 10, 212.
- Ouattara A., Cooke D., Gopalakrishnan R., Huang T., Ables G., 2016. Methionine restriction alters bone morphology and affects osteoblast differentiation. *Bone Reports*, 5, 33-42.
- Peters J.C., Mahan D.C., 2008. Effects of dietary organic and inorganic trace mineral levels on sow reproductive performances and daily mineral intakes over six parities. *J. Anim. Sci.*, 86, 2247-2260.
- Peters J.C., Mahan D.C., Wiseman T.G., Fastinger N.D., 2010. Effect of dietary organic and inorganic micromineral source and level on sow body, liver, colostrum, mature milk, and progeny mineral compositions over six parities. *J. Anim. Sci.*, 88, 626-637.
- PigCHAMP, 2018. Benchmarking. USA 2017 – year end summary. PigCHAMP inc., Ames, IA.  
<https://www.pigchamp.com/benchmarking/benchmarking-summaries>
- Pluym L.M., vanv Nuffel A., vanv 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.
- Quiniou N., Montagne L., 2017. Truie gestante : la perception des problèmes de boiterie. *TechPorc*, 38, 25-27.
- Quiniou N., Boudon A., Dourmad J.Y., Moinecourt M., Priymenko N., Narcy A., 2019. Modélisation du besoin en calcium et variations du rapport phosphocalcique de l’aliment selon le niveau de performance de la truie reproductrice. *Journées Rech. Porcine*, 51, 146-152.
- Quinn A., 2013a. Lameness in pigs, Conference Paper, Moorepark Dissemination Day, 26 July 2013
- Quinn A., 2013b. Nutritional strategies to reduce sow lameness, [www.pig333.com](http://www.pig333.com)
- Quinn A.J., Green L.E., Lawlor P.G., Boyle L.A., 2015. The effect of feeding a diet formulated for developing gilts between 70 kg and similar to 140 kg on lameness indicators and carcass traits. *Livest. Sci.*, 174, 87-95.
- Ritter M.J., Ellis M., Berry N.L., 2009. Review: Transport losses in market weight pigs: 1. A review of definitions, incidence and economic impact. *The Professional Animal Scientist*, 25, 404-414.
- Rucker R.B., Kosonen T., Clegg M.S., 1998. Copper, lysyl oxidase and extra-cellular matrix protein crosslinking. *Am. J. Clin. Nutr.*, 67(Suppl), 996S-1002S.
- Schuttert M., 2008. The economical impact of lameness in sows. FeetFirst™ Symposium on Sow Lameness, Asten/Sterksel, The Netherlands, pp 4.
- Simmins P.H., Brooks, P.H., 1988. Supplementary biotin for sows: effects on claws integrity. *Vet. Record*, 122 ; 431-435
- Smith B., 1988. Lameness in pigs associated with foot and limb disorders. *In Practice*, 10, 113-117.
- Stalder K.J., Knauer M., Baas T.J., Rothschild M.F., Mabry J.W., 2004. Sow longevity. *Pig News Info.*, 25, 53N-74N.
- Stalder K.J., Lacy C., Cross T., Conatser G., 2003. Financial impact of average parity of culled females in a breed to- wean swine operation using replacement gilt net present value analysis. *Swine Health Prod.*, 11, 69-74.
- Stavrakakis S., Guy J.H., Warlow O., 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, 104-13.
- Stavrakakis S., Sandercock D.A., Watt F.E., Paterson E.F., Hall S.A., Coe J.E., Kelly S., Edwards S.A., Guy J.H., 2016. Validation of lameness and joint inflammatory response biomarkers in growing pigs. *Animal Welfare Conference- Recent advances in animal welfare*, at York, UK.

- Stewart, C.L., O'Connell N.E., Boyle L., 2008. Influence of access to straw provided in racks on the welfare of sows in large dynamic groups. *Appl. Anim. Behav. Sci.*, 112, 235-247.
- Sun G., Fitzgerald R.F., Stalder K.J., Karriker L.A., Johnson A.K., Hoff S.J., 2011. Development of an embedded microcomputer-based force plate system for measuring sow weight distribution and detection of lameness. *Applied Eng. Ag.*, 27, 475- 482.
- Toth F., Torrison J.L., Harper L., Bussieres D., Wilson M.E., Crenshaw T.D., Carlson C.S., 2016. Osteochondrosis prevalence and severity at 12 and 24 weeks of age in commercial pigs with and without organic-complexed trace mineral supplementation. *J. Anim. Sci.*, 94, 3817- 3825.
- Tseng S., Reddi A.R., DiCesare P.E., 2009. Cartilage oligomeric matrix protein (COMP): A biomarker of arthritis. *Biomarker Insights*, 4, 33-44.
- Underwood E.J., Suttle N.F., 1999. *The mineral nutrition of livestock*. 3rd Edition ed. CABI Publishing, New York.
- van Der Tol P.P.J., Metz J.H.M., Noordhuizen-Stassen E.N., Back W., Braam C.R., Weijts W.A., 2003. The vertical ground reaction force and the pressure distribution on the claws of dairy cows while walking on a flat substrate. *J. Dairy Sci.*, 86, 2875-2883.
- 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.
- 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 the joint-specific prevalence of osteochondrosis in fattening pigs. *Livest. Sci.*, 135, 53-61.
- van Riet M.M.J., Millet S., Aluwe M., Janssens G.P.J., 2013. Impact of nutrition on lameness and claw health in sows. *Livest. Sci.*, 156, 24-35.
- van Spil W.E., DeGroot J., Lems W.F., 2010. Serum and urinary biochemical markers for knee and hip-osteoarthritis: a systematic review applying the consensus BIPED criteria. *Osteoarthr. Cartil.*, 18, 605-612.
- Varagka N., Lisgara M., Skampardonis V., Psychas V., Leontides L., 2016. Partial substitution, with their chelated complexes, of the inorganic zinc, copper and manganese in sow diets reduced the laminitic lesions in the claws and improved the morphometric characteristics of the hoof horn of sows from three Greek herds. *Porcine Health Management*, 2, 26.
- Watkins K.L., Southern L.L., Miller J.E., 1991. Effect of dietary biotin supplementation on sow reproductive performance and soundness. *J. Anim. Sci.*, 69, 201-206.
- Wedekind K.J., Coverdale J.A., Hampton T.R., Atwell C.A., Sorbet R.H., Lunnemann J., Harrell R.J., Greiner L., Keith N.K., Evans J.L., Zhao J., Knight C.D., 2015. Efficacy of an equine joint supplement, and the synergistic effect of its active ingredients (chelated trace minerals and natural eggshell membrane), as demonstrated in equine, swine, and an osteoarthritis rat model. *Open Access Animal Physiology*, 7, 13-27.
- Wedekind K., Provin A., Foran C., Hampton T., Ren P., Chen J., Vazquez-Anon M., 2019. Assessment of lameness in gilts and barrows using gait score, force-plate, hoof hardness and hoof lesions. *ADSA-ASAS Midwest mtg*, Abstract #582719.
- Williams F.M., Spector T.D., 2008. Biomarkers in osteoarthritis. *Arthritis Res. Ther.*, 10, 101.
- Ytrehus B., Haga H., Mellum C., Mathiesen L., Carlson C.S., Ekman S., Teige J., Reinholt F.P., 2004. Experimental ischemia of porcine growth cartilage produces lesions of osteochondrosis. *J. Orthop. Res.*, 22, 1201-1209.
- Zhao X., Li Z., Wang J., Xing X., Wang Z., Wang L., Wang Z., 2015. Effects of chelated Zn/Cu/Mn on redox status, immune responses and hoof health in lactating Holstein cows. *J. Vet. Sci.*, 16, 439-446.