



La santé osseuse en fin de carrière des poules : un défi pour les nutritionnistes

Michel J Duclos, Audrey Gloux, Agnès Narcy, Quentin Maxime

► To cite this version:

Michel J Duclos, Audrey Gloux, Agnès Narcy, Quentin Maxime. La santé osseuse en fin de carrière des poules : un défi pour les nutritionnistes. 14. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras (JRA), ITAVI, INRAE, CTCPA, ANSES, WVPA, WPSA France, Mar 2022, Tours, France. <hal-04214048>

HAL Id: hal-04214048

<https://hal.science/hal-04214048v1>

Submitted on 21 Sep 2023

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

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

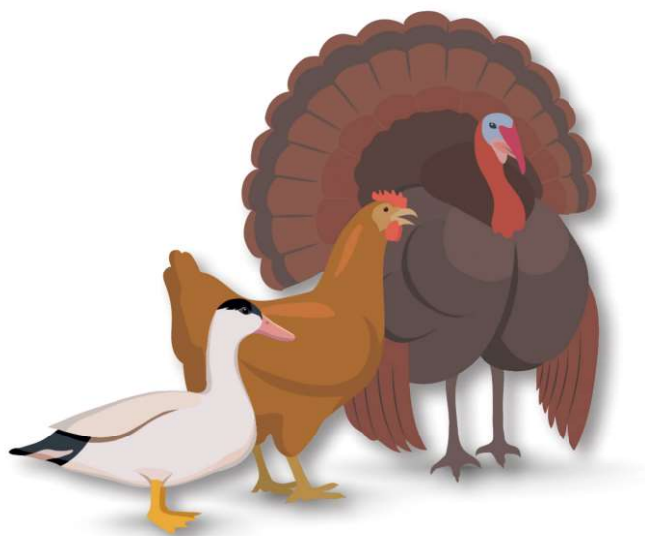


Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

14^e JRA

JOURNÉES DE LA
RECHERCHE AVICOLE ET
PALMIPÈDES À FOIE GRAS

9 & 10 mars 2022
TOURS - Centre des congrès Vinci



Un évènement organisé par :



ACCOMPAGNER
LE MODÈLE AGROALIMENTAIRE
DE DEMAIN



LA SANTE OSSEUSE EN FIN DE CARRIERE DES POULES : UN DEFI POUR LES NUTRITIONNISTES

Duclos Michel J.¹, Gloux Audrey¹, Narcy Agnès¹, Quentin Maxime²

¹UMR BOA INRAE Université de Tours Centre - Centre INRAE– 37380 NOUZILLY,

²ITAVI - Chambre d'agriculture Rennes CS 14226, 35042 Rennes, France

michel.duclos@inrae.fr

RÉSUMÉ

La santé osseuse est une préoccupation majeure en élevage de pondeuses, avec l'apparition de signes pathologiques dès le pic de ponte : ostéoporose, déviations ou fractures du bréchet, voire fracture d'os longs, observés dans tous les systèmes de production. Dans leurs formes les moins graves ces soucis, qui s'aggravent en général en fin de cycle de production, compromettent le bien-être animal, mais peuvent aussi conduire à des réformes et des pertes, allant jusqu'à l'arrêt anticipé d'un lot. Tout indique qu'ils sont liés au fort besoin en Ca pour assurer la synthèse de la coquille. Pour les maîtriser, il est donc indispensable de mieux comprendre les mécanismes physiologiques de l'homéostasie calcique chez la poule et plus particulièrement ceux impliquant le tissu osseux. Au-delà des études classiques qui sont rappelées, de récents travaux apportent des données nouvelles sur les effecteurs du transport de calcium (Ca) au travers de l'épithélium intestinal, sur les mécanismes du turn-over osseux et leurs régulations. Ces travaux sont cohérents avec les précédents pour souligner le rôle central de la vitamine D et de ses métabolites, mais ils mettent aussi en avant un facteur encore peu étudié chez la poule, le Fibroblast Growth Factor-23 (FGF23). Celui-ci est exprimé par le tissu osseux et exercerait son action en favorisant l'excrétion urinaire du phosphore (P) résultant de l'ostéolyse. Par ailleurs, en inhibant la synthèse de la forme active de vitamine D3 ou en activant sa dégradation, il exercerait un rétrocontrôle négatif sur la rétention de Ca et de P. FGF23 est surexprimé chez la poule en fin de ponte par rapport à celle au pic de ponte. Ceci ouvre des perspectives de recherche pour savoir s'il est la cause ou seulement un marqueur des dérégulations du métabolisme phosphocalcique.

ABSTRACT

Late-life bone health in hens: a challenge for nutritionists

Bone health is a major concern in layer production, with pathological signs appearing as soon as laying peaks: osteoporosis, deviations or fractures of the wishbone, or even long bone fractures, observed in all production systems. In their less serious forms, these problems, which generally worsen at the end of the production cycle, compromise animal welfare, but they can also lead to culling and losses, or to the early termination of a flock. Everything indicates that they are linked to the high Ca requirement for shell synthesis. In order to control them, it is therefore essential to better understand the physiological mechanisms of calcium homeostasis in hens, particularly those involving bone tissue. In addition to the classic work that is mentioned, the team's recent work provides new data on the effectors of calcium transport through the intestinal epithelium, on the mechanisms of bone turnover and their regulation. This work is consistent with previous ones in highlighting the central role of vitamin D and its metabolites, but it also highlights a factor that has not yet been studied in details in the laying hen, Fibroblast Growth Factor-23 (FGF23). This is expressed by bone tissue and is thought to exert its action by promoting the urinary excretion of P resulting from osteolysis. In addition, by inhibiting the synthesis of the active form of vitamin D3 or by activating its degradation, it would exert a negative feedback on Ca and P retention. FGF23 is overexpressed in the late laying hen compared to the peak laying hen. This opens up the possibility of research into whether FGF23 is the cause or only a marker of deregulation of phosphocalcic metabolism.

INTRODUCTION

L'intensité de ponte et la qualité des œufs, notamment celle de sa coquille, sont les deux premiers critères de succès d'un lot de pondeuses et conditionnent son maintien au-delà du pic de ponte. Pour autant, la santé osseuse est aussi une préoccupation majeure en élevage, avec l'apparition de signes pathologiques dès le pic de ponte : ostéoporose, déviations ou fractures du bréchet, voire fracture d'os longs. Dans leurs formes les moins graves, ces soucis compromettent le bien-être animal, mais ils peuvent aussi conduire à des réformes et des pertes, allant jusqu'à l'arrêt anticipé d'un lot. Pour maîtriser ces problèmes, il est indispensable de mieux comprendre les mécanismes physiologiques contrôlant le métabolisme osseux chez la poule.

1. IMPORTANCE DU COMPARTIMENT OSSEUX DANS LE MÉTABOLISME PHOSPHOCALCIQUE DE LA POULE PONDEUSE

La synthèse d'une coquille d'œuf requiert environ 2 g de Ca qui proviennent en majorité de l'alimentation ingérée en phase diurne. Cependant, cette synthèse ayant lieu la nuit une partie va provenir de l'os qui en est l'organe de stockage. Pour répondre à ce défi métabolique la poule développe avec la maturité sexuelle un certain nombre d'adaptations (Nys et Le Roy, 2018). Celles-ci lui permettent d'augmenter l'assimilation et la rétention de Ca ainsi que son stockage intermédiaire dans l'os, afin de le libérer dans la circulation et à destination de l'utérus pendant la période sombre. La forte assimilation de Ca est rendue possible par le développement progressif d'un appétit spécifique pour le Ca qui apparaît environ 4 semaines avant la production du premier œuf (Voir Nys et Le Roy, 2018 pour une revue). Il est classiquement admis que la demande de l'utérus pour assurer la synthèse de la coquille est prioritaire (voir Nys et Le Roy 2018 pour une revue).

1.1. Adaptations physiologiques lors de la maturité sexuelle

Les poules actuelles sont matures à partir de 18-19 semaines, suite à 4 semaines d'imprégnation en œstrogènes, qui ont aussi des répercussions sur le foie, le rein et l'os (Nys et Le Roy 2018). Leur action s'exerce sur la synthèse hépatique des protéines liant la Vitamine D (VDBP), sur l'activité de la 1 α -hydroxylase, enzyme rénale conduisant à l'augmentation des concentrations circulantes en 1,25(OH)₂D₃ (forme active de la vitamine D₃), et l'apparition d'une structure osseuse particulière, l'os médullaire. Celui-ci présente un cycle quotidien de

remodelage osseux pour assurer les besoins en Ca au cours de la journée. L'augmentation de la forme active de vitamine D₃ induit une forte augmentation de l'absorption intestinale de Ca à la maturité sexuelle. L'absorption au travers de l'épithélium intestinal peut se faire par deux mécanismes complémentaires (voir Nys et Le Roy, 2018 pour revue et Figure 1). Le premier est un mécanisme de transport facilité et saturable au travers de la cellule (voie transcellulaire). Il implique un canal calcique de type TRPV pour l'entrée du Ca au pôle apical de l'entérocyte, la calbindine, protéine de liaison du Ca intracellulaire, et des transporteurs assurant la sortie du Ca au pôle baso-latéral vers la circulation sanguine. Ces derniers sont des transporteurs dépendant de l'ATP et un échangeur à sodium. Cette voie transcellulaire est particulièrement adaptée aux passages de Ca lorsque les concentrations dans la lumière sont faibles. Le second mécanisme implique un transport passif et non saturable, au travers de pores présents entre les cellules épithéliales, il est qualifié de paracellulaire. Les acteurs de cette voie sont les protéines constitutives des jonctions serrées entre entérocytes, claudines (CLDN), occludine (OCLN) et protéines des jonctions serrées (TJP). Alors que la maturité sexuelle avait été associée depuis longtemps à l'induction des acteurs de la voie de transfert transcellulaire et notamment de la calbindine (Nys et Le Roy, 2018), des travaux récents montrent aussi l'induction des acteurs de la voie paracellulaire d'absorption de Ca (Gloux et al, 2019). La vitamine D₃, en présence de concentrations plasmatiques croissantes en Ca et P, permet aussi la minéralisation de l'os médullaire.

1.2. Le cycle quotidien d'assimilation du Ca chez une poule au pic de ponte

La biominéralisation de la coquille est un processus très rapide qui se déroule quotidiennement dans la glande utérine et implique une exportation massive de Ca de la circulation sanguine vers le fluide utérin, représentant 10 % du stock corporel. Cet export induit ponctuellement une hypocalcémie qui met en route une cascade de régulations hormonales (résumée en Figure 2) pour rétablir une calcémie normale, en mobilisant tous les organes nécessaires. Le défi imposé à la poule est d'autant plus important que le Ca provient de l'aliment ingéré pendant la journée, mais doit être fourni à l'utérus pour la synthèse de coquille pendant la nuit.

La première adaptation est comportementale, la poule présente un appétit spécifique pour le Ca qui se manifeste 4 h avant l'extinction de la lumière. Elle recherche les particules de CaCO₃ les plus grosses. Celles-ci seront retenues dans son estomac induisant une libération d'acide chlorhydrique propice à la solubilisation lente du carbonate de Ca.

La majorité du Ca soluble est ensuite absorbé dans les parties proximales de l'intestin grêle, duodénum et jéjunum. Il est bien établi que cette absorption

augmente lors de la phase de synthèse de la coquille quand le besoin est maximal. Son passage emprunte les voies transcellulaire et paracellulaire décrites dans le paragraphe précédent. Des travaux récents (Gloux et al, 2019) permettent d'établir une liste plus complète d'acteurs de la voie transcellulaire, exprimés dans les différents segments de l'intestin grêle de la poule, ceux-ci sont présentés dans la Figure 1 adaptée de Gloux et al, (2019) et leurs variations au cours du cycle ovulatoire sont illustrées sur la Figure 2, résumant les résultats de Gloux et al. (2020 a). Le canal TRPV6, décrit comme l'acteur majeur de l'entrée du Ca dans l'entérocyte de mammifère, n'est pas détecté chez la poule. Plusieurs gènes apparentés, TRPV2, TRPC1 et TRPM7 sont détectés (Gloux et al, 2019). TRPV2 est spécifiquement surexprimé dans le jéjunum au stade tardif de formation de la coquille et juste après l'oviposition pendant la phase d'ostéosynthèse (Gloux et al, 2020 a). L'expression de la calbindine, détectée dans tous les segments, ne varie pas avec le cycle (Gloux et al, 2020 a). L'expression de plusieurs ATPase impliquées dans la sortie du Ca au pôle basal est détectée, ATP2B1, ATP2B2 et ATP2B4. L'une d'entre elles, ATP2B2, est fortement induite dans le duodénum au stade précoce de minéralisation de la coquille, alors que les deux autres, ATP2B1 et ATP2B4, sont induites au stade tardif de minéralisation, dans les deux segments proximaux, duodénum et jéjunum (Gloux et al, 2020 a). Par ailleurs et pour la première fois ces études détectent l'expression de 9 gènes candidats impliqués dans le transport paracellulaire du Ca au travers des jonctions serrées. Parmi eux 4 gènes codent pour des claudines, dont 2 avec une sélectivité pour le Ca (CLDN2 et CLDN12). Dans le duodénum, la CLDN2 est régulée au cours du cycle ovulatoire, avec une surexpression relative juste après l'oviposition et pendant la phase tardive de calcification (Gloux et al, 2020 a). L'expression des gènes codants pour les protéines constitutives de la jonction serrée est détectée aussi dans l'intestin grêle (Gloux et al, 2020 a). Il s'agit des protéines des jonctions serrées, produits des gènes TJP (1 à 3), et de l'occludine (OCLN). Seul le gène TJP3 est régulé au cours du cycle, avec une surexpression relative pendant la calcification. Plusieurs acteurs des deux voies sont donc induits pendant la phase de synthèse de la coquille, ce qui indique qu'elles peuvent coopérer au transfert de Ca au travers de l'épithélium digestif (Gloux et al, 2020 a). Lorsque la lumière intestinale se retrouve dépourvue de Ca soluble, quelques heures après l'arrêt de l'ingestion de Ca, une nouvelle hypocalcémie va induire la mobilisation du Ca osseux.

1.3. L'os médullaire, siège d'un cycle quotidien de remodelage osseux

C'est la libération de parathormone (PTH) en réponse à l'hypocalcémie qui induit l'activation des ostéoclastes, cellules responsables de l'ostéolyse. Ce

processus va libérer du Ca et du P. Le premier est exporté vers l'utérus, alors que le second inutile pour la synthèse de la coquille est éliminé par le rein. Des travaux récents (Gloux et al, 2020 a) ont montré que cette phase était associée à l'expression dans l'os médullaire de gènes impliqués dans le turn-over osseux et du Facteur de Croissance des Fibroblastes - 23 (FGF23). Celui-ci a pour fonction première de signaler au rein la nécessité d'éliminer l'excès de P. Il lui signale aussi de réduire la production rénale de 1,25OH2D3, en inhibant l'expression et l'activité de l'enzyme 1 α -hydroxylase, et en activant l'enzyme 24-hydroxylase, impliquée dans la dégradation de 1,25OH2D3. Il en résultera donc une diminution de la captation intestinale de Ca et de P, puis de leur libération osseuse. Après la phase de calcification, puis d'oviposition, le besoin en Ca diminue, l'ostéolyse s'arrête et c'est une phase d'ostéosynthèse qui démarre (Gloux et al, 2020 a), attestée par l'expression de gènes impliqués dans ce processus.

Chez des jeunes poules au pic de ponte, c'est le stade dans le cycle ovulatoire qui détermine la majorité des paramètres étudiés (Gloux et al, 2020, a). Cependant les concentrations circulantes en 1,25OH2D3 sont plus élevées chez les poules nourries avec des particules fines, suggérant un état d'hypocalcémie plus marqué (Gloux et al, 2020 a) et la forme de l'apport calcique influe sur l'expression de certains transporteurs intestinaux. Ainsi, l'apport de particules grossières conduit à une expression accrue à certains stades, pour TRPV2 à 0-1 h PO, ATP2B2 et CLDN12 à 9-10 h PO, ATP2B2 et OCLN dans le duodénum. On observe aussi un effet bénéfique global des particules grossières avec une augmentation de l'expression des transporteurs TRPM7, TRPC1, TJP2 et du récepteur à la vitamine D (VDR). Plusieurs marqueurs d'une activité forte de remaniement osseux sont surexprimés dans l'os médullaire des poules nourries avec des particules fines, qu'ils soient plutôt associés à l'ostéosynthèse (COL1A), à l'ostéolyse (ACP5, CTSK, OPG) ou à leur régulation (ITGB1 et MMP2). Ces résultats suggèrent donc que l'effet bénéfique de l'apport de carbonate de Ca en particules grossières s'expliquerait par une moindre mobilisation osseuse, associée à un meilleur potentiel de captation intestinale du Ca.

2. LES PERTURBATIONS DU METABOLISME PHOSPHOCALCIQUE EN FIN DE PONTE ET SES CONSEQUENCES SUR LE STATUT OSSEUX

2.1. Des altérations observables du tissu osseux

Les premières observations sont anciennes. On parlait déjà dans les années 1955 d'une fatigue de la poule en cage qui s'accompagnait de difficultés de la posture debout, d'une mauvaise qualité de coquille pouvant aller jusqu'à l'arrêt de la ponte, voire la paralysie en

cas de fractures vertébrales et la mort. Ces poules présentaient aussi des os fragiles, signe d'ostéoporose. Ce syndrome arrive dès le pic de ponte suite à des défauts de conduite d'élevage, notamment d'apport en minéraux. L'ostéoporose chez la poule résulte de la diminution de quantité d'os structural minéralisé, qui le rend fragile et sujet aux fractures. Cette altération est présente dans tous les systèmes d'élevage (Whitehead & Flemming, 2000). Récemment, ce sujet a fait l'objet d'un regain d'intérêt du fait de l'incidence élevée de défauts du bréchet, allant de déviations à des fractures avérées, sources de mal-être chez les poules. Ces défauts présentent une fréquence et une sévérité accrues dans les systèmes alternatifs (de type volière notamment) dans lesquels les poules évoluent sur plusieurs niveaux (voir revue de Toscano et al, 2020). Ils sont associés à des défauts de type ostéoporotique observables par radiographie. Les travaux récents de Gloux et al, 2020 b apportent une vue globale des perturbations observables chez des poules en fin de cycle de ponte par rapport à des poules au pic de ponte. Ils sont présentés dans le Tableau 1, décrits et discutés dans les paragraphes suivants (2.2 à 2.4).

2.2. Altération du métabolisme de la vitamine D3

Plusieurs études notent un déficit de 1,25OH2D3 chez des poules âgées, associé à une réduction de l'activité de l'enzyme rénale 1 α -hydroxylase (Abe et al, 1982 ; Gloux et al, 2020 b). Ce déficit en 1,25OH2D3 pourrait expliquer la diminution de l'absorption intestinale de Ca avec l'âge (Al-Batshan et al, 1994 ; Franco-Jimenez & Beck, 2005).

2.3. Altération du fonctionnement des effecteurs tissulaires et moléculaires

En cohérence avec la diminution de l'absorption intestinale préalablement décrite, une étude récente (Gloux et al, 2020 b) indique que plusieurs acteurs du transport transcellulaire (TRPM7, TRPV2) et du transport paracellulaire (CLDN2 et CLDN12 au stade 9-10 h PO) de Ca voient leur expression diminuer entre 23 et 90 semaines d'âge, en même temps que celle du VDR. Au niveau rénal, la diminution de l'expression de TRPV5 pourrait réduire la réabsorption du Ca chez les poules de 90 semaines. Tout ceci pourrait contribuer à une hypocalcémie et au déclenchement de l'ostéolyse. L'expression de RANK, marqueur de l'ostéoclastogénèse, a lieu plus tôt dans le cycle chez les vieilles que chez les jeunes poules. Il s'avère qu'au moins deux marqueurs d'ostéolyse, CA2 et OPG sont exprimés à un niveau supérieur chez les vieilles poules. Il en est de même pour FGF23, qui pourrait exercer son effet phosphaturiant en réduisant l'expression des transporteurs responsables de la réabsorption tubulaire de P, SLC20A1 et SLC34A1 chez la vieille poule, permettant ainsi que la phosphatémie reste similaire entre les deux groupes. A l'inverse, COL1A,

marqueur de l'ostéosynthèse est exprimé à un moindre niveau.

2.4. Un rôle pivot pour FGF23 ?

Nous avons vu chez la jeune poule, que l'expression de FGF23 était spécifiquement induite dans l'os médullaire au cours du cycle, lorsque l'ostéolyse avérée par la libération du P, s'active (Gloux et al, 2020 a). Quoi qu'il reste à en mesurer les conséquences sur les concentrations circulantes en FGF23, les effecteurs de la réponse rénale sont exprimés dans cet organe (KL, FGFR3, CYP27C1 et SLC34A1), ce qui devrait conférer à FGF23 les effets attendus sur l'élimination urinaire du P et sur l'inhibition de la production de 1,25OH2D3. Les travaux de Ren et al (2017) le confirment, puisque l'immunisation contre FGF23 réduit l'excrétion de P chez la poule. Chez la vieille poule, la régulation au cours du cycle est conservée, cependant les niveaux d'expression sont aussi plus élevés que chez la jeune poule. Nous formulons l'hypothèse que cet excès de FGF23 pourrait expliquer pour partie les concentrations plus faibles en 1,25OH2D3 chez la poule âgée et contribuer ainsi à une moindre rétention du Ca dans l'organisme et en particulier une moindre absorption de Ca et reconstitution du stock osseux.

2.5. Quel lien entre qualité de la coquille et statut osseux ?

Après le pic de ponte, les poules présentent à la fois des défauts de solidité de coquille et des défauts osseux. Ces deux défauts qui compromettent la carrière d'un lot sont-ils indissociables, à l'échelle collective et à l'échelle de l'individu ? Bishop et al, (2000) ont observé que des poules sélectionnées génétiquement pour être plus résistantes à l'ostéoporose déposent moins de calcium pour la synthèse de la coquille, alors qu'elles ne diffèrent pas en termes de reproduction. Eusemann et al., (2018) ont constaté une incidence réduite des fractures dans une lignée ponte brune peu productive par rapport à une lignée brune fortement productive. De récents travaux indiquent que des poules sélectionnées individuellement pour une bonne qualité de coquille présenteraient des concentrations circulantes plus élevées en CTX, un marqueur d'ostéolyse (Pampouille et al, 2022). Ces différentes études suggèrent donc une corrélation négative entre ces deux paramètres et justifient la recherche d'un compromis optimal. Plusieurs études citées par Toscano et al. (2020) apportent des résultats similaires. Ce travail de synthèse a été réalisé dans le cadre d'un large projet portant sur les défauts du bréchet chez la poule pondeuse, un problème de bien-être considéré actuellement comme majeur. Il apparaît que ce syndrome, même s'il est probablement lié au niveau de production d'œufs, est d'origine multifactorielle avec des facteurs prédisposants liés à l'âge au premier œuf, à l'ossification tardive du

bréchet, à des maladies osseuses et au manque d'activité physique.

3. QUELLES PISTES POUR L'AVENIR ?

3.1. Une meilleure maîtrise de l'apport de Ca et P à l'échelle horaire

Il est connu depuis longtemps qu'un apport séparé en Ca est bénéfique pour la qualité de la coquille et réduit le nombre d'œufs cassés en élevage (Sauveur, 1992). Cette stratégie semble aussi diminuer le recours à l'ostéolyse, comme en atteste une phosphatémie plus basse. Si un apport trop faible peut pénaliser le taux de ponte, la synthèse de la coquille requière des quantités minimales de P. Il existe une corrélation négative entre phosphatémie et qualité de la coquille d'œuf, qui interroge sur la possibilité d'un effet négatif sur la qualité de coquille d'un apport nutritionnel excessif en P. Une stratégie intéressante consisterait à distribuer un apport différent entre le matin et l'après-midi, offrant des teneurs basses en Ca et hautes en P le matin (1,5 % Ca et 0,63 % Pd) et l'inverse l'après-midi (5,3 % Ca et 0,05 % Pd). D'après Sauveur (1992), un tel régime comparé à un apport constant et moyen sur la journée (3,8 % Ca et 0,30 % Pd) améliorerait le poids de coquille et réduirait drastiquement le nombre d'œufs fêlés ou cassés. Il s'accompagnerait aussi de valeurs plus faibles de phosphatémie pendant la phase de calcification, ce qui signe très probablement une réduction du recours à l'ostéolyse.

Les apports minéraux ne sont pas les seuls à devoir être considérés. En effet, idéalement la poule aurait besoin d'un apport supérieur en protéines et énergie le matin, au moment où le besoin en Ca est plus faible. Dans une revue de synthèse Molnar et al. (2018) comparent différentes stratégies nutritionnelles basées sur l'alimentation au choix ou l'alimentation séquentielle. Ces stratégies permettent d'adapter les apports aux besoins en fonction du stade du cycle, mais leurs résultats sont contrastés d'une étude à l'autre. Le seul régime qui recueille l'unanimité est celui basé sur l'alimentation en mélange libre avec des particules de carbonate de calcium de différentes tailles, permettant à la poule de trier selon son besoin.

3.2. Une meilleure maîtrise de la nutrition minérale sur de longues périodes

Le besoin en Ca et P varie avec le stade physiologique et l'âge de la poule. Chez la poule en ponte, celui en Ca augmente alors que celui en P diminue.

Le réservoir osseux étant sollicité quotidiennement et sur une période longue, les déficits éventuels vont forcément se cumuler, et ce d'autant plus que le décalage de la ponte dans la journée va repousser la phase de synthèse de coquille pendant la nuit. Il importe en premier lieu que la poule commence sa

carrière de pondeuse avec un potentiel osseux optimal. Il serait donc souhaitable d'augmenter l'apport calcique assez tôt, et pourquoi pas sous forme d'un aliment séparé riche en particules grossières pour permettre de répondre plus efficacement à l'appétit calcique précoce des futures poules pondeuses.

La rétention du Ca étant sous la dépendance de la vitamine D un apport adéquat doit les favoriser. Les recommandations d'apport de vitamine D3 augmentent avec l'âge, mais encore faut-il que celle-ci soit métabolisée correctement pour être active. Ceci implique 2 phases successives d'hydroxylation, la première hépatique conduit à la 25OHD3, d'ailleurs disponible sous forme d'additif alimentaire. Les concentrations circulantes de ce métabolite sont relativement stables dans la journée et l'on considère qu'elles reflètent le statut vitaminique de la poule. Une seconde hydroxylation, rénale, conduit à la forme active 1,25OH2D3 qui circule à des concentrations beaucoup plus faibles (environ 1/1000 de 25OHD3) et varient fortement en fonction du stade du cycle ovarien. Plusieurs études montrent un effet bénéfique de la 25OHD3 sur le statut en vitamine D3 et sur les paramètres de qualité d'œuf et d'os (Swiatkiewicz et al, 2017). Certaines études ont envisagé d'incorporer le métabolite 1,25OH2D3 dans l'aliment. Ce produit ne semble pas apporter de bénéfice particulier sur la qualité des œufs lorsqu'il est ajouté à un régime apportant déjà de la vitamine D3 (Frost et al, 1990). Il pourrait cependant présenter un effet bénéfique sur la solidité osseuse.

3.3. Perspectives de recherche

La littérature et nos travaux récents indiquent différentes pistes de recherche, notamment pour passer de marqueurs invasifs à des marqueurs non invasifs permettant un suivi des poules à plusieurs stades successifs.

Nos observations indiquent clairement que le turn-over osseux est important pendant la phase de synthèse de la coquille, y compris chez des poules au pic de ponte nourries avec un apport mélangé de carbonate de Ca en particules fines et grossières (Gloux et al, 2020a), même s'il est plus favorable que le régime apportant uniquement du carbonate en particules fines. Ceci suggère que des particules encore plus grosses ou présentant une cinétique de solubilisation plus lente à taille égale pourraient présenter un intérêt pratique en libérant du Ca soluble plus tard pendant la nuit. Leur intérêt serait d'autant plus évident chez les poules en fin de carrière qui présentent des signes d'une ostéolyse accrue et d'une ostéosynthèse réduite (Gloux et al, 2020 b).

Les niveaux d'expression élevés en FGF23 observés chez ces poules en fin de cycle de production pourraient être le marqueur ou la cause de

l'inadéquation des apports P/Ca aux besoins (Gloux et al, 2020 b). Il conviendrait pour le démontrer de développer une méthode de dosage sur prélèvements sanguins issus de situations variées et collectés à plusieurs stades de la vie productive des poules.

Par ailleurs, les poules qui présentent une meilleure qualité de coquille semblent plus sujettes à l'ostéolyse, attestée par le dosage du marqueur CTX, dès le début de ponte et jusque tardivement, même si l'étude microultrastructurale ne permet pas de mettre en évidence de différence entre les lots sélectionnés sur la bonne ou mauvaise qualité de coquille (Pampouille et al, 2022). Elles présentent précocement des concentrations circulantes en 25OHD3 plus élevées, et en fin de ponte (96

semaines) des concentrations circulantes en 1,25OH3D3 plus élevées.

CONCLUSION

L'ostéoporose chez la poule reste un problème important qui conduit ou au moins prédispose à des troubles osseux sources de mal-être ou de réforme précoce de certains lots et ceci dans tous les systèmes de production. Des travaux restent à engager pour identifier des marqueurs non ou peu invasifs pour évaluer différentes stratégies nutritionnelles basées sur des apports plus précis en minéraux (Ca et P) ou en métabolites de la vitamine D en fonction du stade dans la carrière de la poule ou du stade physiologique à l'échelle de la journée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abe E. et al, 1992. J. Nutr. (112) 436-446
 Al-Batshan H.A. et al., 1994. Poult.Sci., (73), 1590-1596
 Bar A. and Hurwitz S., 1987. J. Nutr., (117), 1775-1779
 Bishop S.C. et al., 2000. Br. Poult.Sci., (41), 33-40
 Eusemann B.K. et al. , 2018. PLoS One 13 : e0194974
 Franco-Jimenez D.J. and Beck M.M., 2005. Int.J. Poult.Sci. (4), 518-522
 Frost T. and Roland D. 1990. Poult.Sci., (69), 2008-2016
 Gloux A. et al, 2019. Poult Sci. (98), 6005-6018
 Gloux A. et al, 2020 a Dom. Anim. Endocrinol. (72), 106407
 Gloux A. et al, 2020 b. Sci. Rep. 10:21124 <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78106-7>
 Molnar A. et al. 2018. WPSJ, (74)
 Nys Y. and Le Roy N. 2018 in: Vitamin D (Elsevier edit), Volume 1: Biochemistry, Physiology and Diagnostics, Fourth Edition pp 361.
 Papouille E. et al, 2022. 14èmes JRA-PFG
 Ren Z. et al., 2017. Poult.Sci., (96), 127-134
 Sauveur B. 1992. INRA Prod. Anim, 5 (1), 19-28
 Swiatkiewicz S. et al, 2017. WPSJ, (73 :1), 57-68
 Toscano M.J. et al, 2020. Poult.Sci., (99), 4183-4194
 Whitehead C.C. & Flemming R.H., 2000. Poult.Sci., (79), 1033-104

Figure 1. Représentation schématique des protéines et gènes impliqués dans le transport de Ca au travers de l'épithélium intestinal de poule (d'après Gloux et al, 2019)

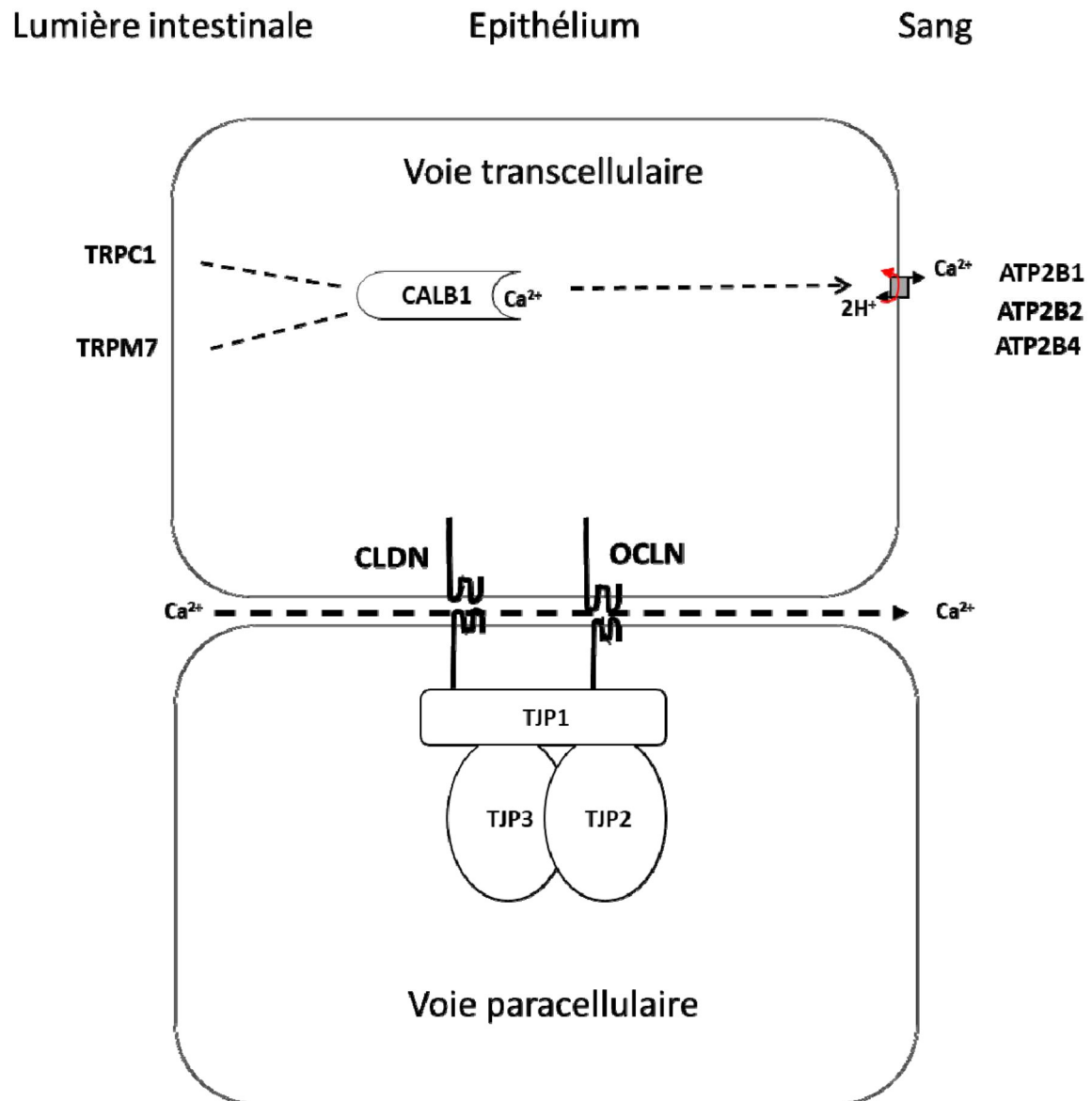


Figure 2. Représentation schématique des effecteurs de l'homéostasie phosphocalcique chez la poule et de leurs modifications au cours du cycle ovulatoire chez la poule (D'après Gloux et al, 2020 a). PO = Post Ovulation

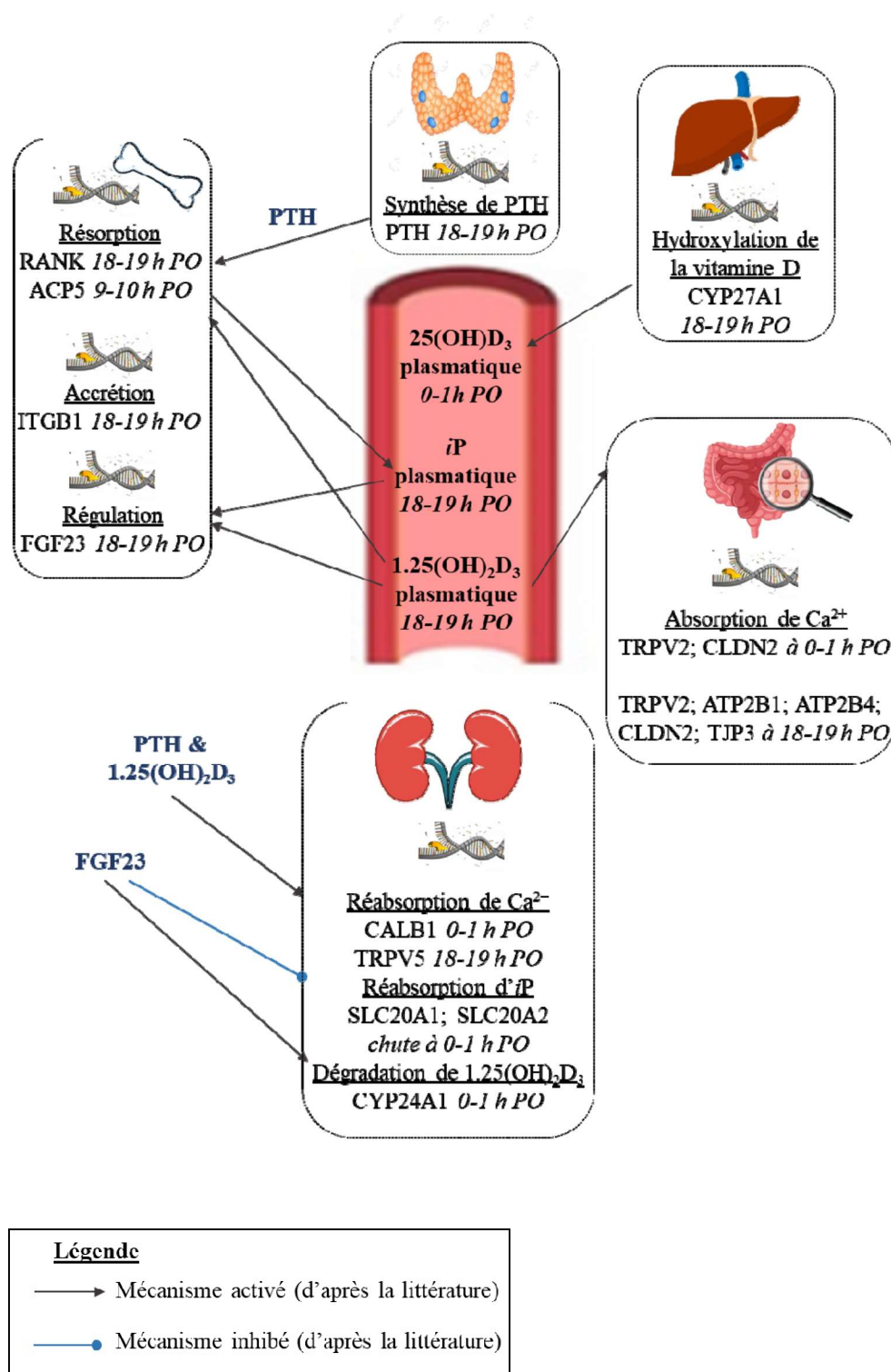


Tableau 1 : Evolution des paramètres du métabolisme calcique entre des poules au pic de ponte (23 semaines) et des poules en fin de ponte (90 semaines). Le tableau résume les résultats décrits dans la publication de Gloux et al, 2020b. PO = Post Ovulation

Tissu - fonction	Paramètres	90 vs 23 semaines
Glande parathyroïde	ARNm PTH	=
Plasma	[Ca] total [iP] [25 OH D3] [1,25 (OH)2D3]	= = = -
Os médullaire - résorption - ostéosynthèse - régulation	ARNm CA2, OPG ARNm RANK (@ 9-10 h PO) ARNm COL1A1 ARNm FGF23	+ + - +
Foie - métabolisme vit D - récepteurs aux œstrogènes	ARNm Cyp27A1 ARNm ESR1 et ESR2	- -
Jéjunum / absorption de Ca - transcellulaire - paracellulaire - régulation	ARNm TRPM7 et TRPV2 ARNm TRPC1 et ATP2B4 ARNm CLDN2 et TJP2 ARNm OCLN (@ 0-1 h PO) ARNm CLDN12 (@ 9-10 h PO) ARNmTJP1 ARNm VDR	- + - - - + -
Rein - réabsorption du Ca - réabsorption du P - dégradation de vit D	ARNm TRPV5 ARNm SLC34A1 et SLC20A1 ARNm CYP24A1 (@ 18-19 h PO)	- - +