

SYSTEME ENERGETIQUE ET REDUCTION DES APPORTS DE PROTEINES EN PRODUCTION AVICOLE

Noblet Jean¹, Cayzac Angélique², Cozannet Pierre²

¹Retraité INRAE, consultant

²ADISSEO France SAS, 10 Pl. du Général de Gaulle, 92160 ANTONY, France

jean.noblet56@orange.fr

RÉSUMÉ

L'alimentation du poulet de chair représente une part majeure de son coût de production, l'apport d'énergie contribuant à souvent plus des 2/3 du coût alimentaire. Par ailleurs, on assiste à une diversification progressive des ressources alimentaires en ayant recours à des matières premières peu utilisées jusqu'à présent en aviculture, tout en prenant en compte l'évolution des besoins des animaux avec une précision accrue et des objectifs de durabilité des systèmes de production avicole. A cet égard, une valorisation maximale des protéines alimentaires et la réduction des rejets d'azote dans les excréta sont recherchées au travers d'une diminution de la teneur en protéines des aliments tout en maintenant les apports d'acides aminés essentiels. Les données de la bibliographie indiquent que l'abaissement de la teneur en protéines est réalisable avec des conséquences limitées sur les performances du poulet de chair; toutefois, l'indice de consommation est légèrement plus élevé et surtout l'adiposité de l'animal est accrue. Ce point pose la question de l'estimation de la valeur énergétique des aliments et les possibles limites du système énergie métabolisable (EMA), en particulier la valeur EMA ajustée pour un bilan azoté nul (EMAn). D'autres systèmes basés sur la valeur EMA standardisée pour une rétention azotée du poulet comparable à la pratique (EMAs) ou sur la valeur énergie nette (EN) sont décrits. L'impact du choix du système (EMAn vs EMAs vs EN) sur les valeurs énergétiques relatives de matières premières types et les résultats de la formulation d'aliments complets pour le poulet de chair dans différents contextes nutritionnels et de coût des matières premières est évalué, en particulier lorsque la teneur en protéines des aliments est réduite. En conclusion, la synthèse suggère la nécessité de poursuivre des travaux sur le métabolisme des acides aminés essentiels et non essentiels chez le poulet de chair et de continuer à affiner les systèmes énergétiques en volailles.

ABSTRACT

Energy evaluation system and reduction of protein supplies in poultry production

Feeding broilers represents the most important cost of their production, energy contributing to more than 2/3 of the feed cost. A progressive diversification of the feed resources is also observed by using not commonly used ingredients in a context of changes of broilers nutritional requirements that should be more accurate and adapt to sustainability concerns for poultry production. On these bases, a maximized efficiency of dietary protein and an associated reduction of N in excreta are targeted via a reduction of the dietary crude protein level combined with constant essential amino acids levels in the diet. Literature results indicate that achieving that reduction of dietary protein level is possible with minor consequences on performance. However, the feed efficiency is slightly decreased and the body fatness is increased. These latter results suggest some limits in energy evaluation systems used in poultry production, especially the metabolizable energy (AME) system corrected for zero nitrogen balance (AMEn). Other systems based either on AME standardised for the actual nitrogen retention observed in broilers (AMEs) or on net energy (NE) are described. The impact of energy system (AMEn vs AMEs vs NE) on relative energy values of typical ingredients and the results of least-cost formulation of complete feeds for broilers in different nutritional situations and costs of ingredients is evaluated, especially for preparing diets with reduced crude protein levels. In conclusion, this review suggests to keep studying the metabolism of essential and non-essential amino acids in broilers and to refine energy evaluation systems for poultry feeds.

INTRODUCTION

L'alimentation du poulet de chair ou, dans une moindre mesure, de la poule pondeuse représente une part majeure du coût de production total avec l'apport d'énergie contribuant à souvent plus des 2/3 du coût alimentaire. Par ailleurs, on assiste à une diversification progressive des ressources alimentaires avec le recours à des nouvelles matières premières peu utilisées jusqu'à présent en aviculture (co-produits, par exemple), tout en prenant en compte les évolutions des besoins des animaux et ce avec une précision accrue (alimentation de précision) de façon à mieux adapter l'aliment à l'animal tout en minimisant le "gaspillage" de nutriments et d'énergie (Méda et al., 2019).

Dans ce contexte et comme pour la production porcine par exemple, la meilleure connaissance des besoins en acides aminés (AA) du poulet de chair ou de la poule pondeuse ainsi que la nécessité de réduire les rejets d'azote dans les excréta et/ou le moindre recours aux matières premières d'importation riches en protéines telles que le tourteau de soja ont conduit à abaisser le taux de protéines des aliments tout en maintenant, voire accroissant légèrement, les apports d'AA essentiels dans les aliments et recourant alors plus aux AA de synthèse apportés sous forme libre (Cappelaere et al., 2021). Ce contexte incite également à disposer d'outils d'évaluation des aliments et des besoins des animaux qui soient de plus en plus performants et à même d'apprécier la globalité du système de production animale. A cet égard, des interrogations se sont faites jour afin d'estimer au mieux la valeur énergétique des aliments (Noblet et al., 2022).

L'objectif de cette synthèse est donc de passer en revue les différents modes d'évaluation de l'énergie des aliments en production avicole en analysant plus précisément les interactions pouvant exister entre le système énergétique choisi et la teneur en protéines des matières premières et des aliments complets.

1. REDUCTION DE LA TENEUR EN PROTEINES DE L'ALIMENT ET PERFORMANCES EN PRODUCTION AVICOLE

Le besoin protéique du poulet de chair ou de la poule pondeuse consiste en un besoin d'AA essentiels non synthétisés par l'animal et à fournir dans des proportions optimales et d'acides aminés non essentiels dans des proportions en principe indifférenciées. Pour les AA essentiels, on définit alors, d'une part, le niveau de lysine – généralement premier acide aminé limitant - dans l'aliment et, d'autre part, le niveau minimal des autres AA essentiels relativement à la lysine (Rostagno et al., 2018). La diminution du taux de protéines de l'aliment se traduit par une réduction de la teneur de tous les

AA mais de façon plus marquée pour quelques AA essentiels comme la lysine, la thréonine, les acides aminés soufrés (méthionine et cystine), le tryptophane ou la valine. Leur disponibilité sous forme libre permet alors de compenser ces déficits tout en continuant de réduire le taux de protéines. De nombreux travaux ont été réalisés sur ce thème au cours de la dernière décennie afin, d'une part, de préciser les besoins en tous les AA essentiels relativement à la lysine et leurs interactions éventuelles (notion de protéine idéale) et, d'autre part, le taux minimal de protéines et donc d'AA non essentiels (Chrystal et al., 2020; Kidd et al., 2021; Liu et al., 2021; Star et al., 2021). Le besoin en lysine, l'AA de référence, est fonction de facteurs liés à l'animal comme son âge, son génotype ou son stade physiologique. Une conséquence essentielle de cette diminution de la teneur en protéines et de la supplémentation en AA essentiels dans l'aliment est de fournir tous les AA dans des proportions de plus en plus optimales pour l'animal et, en conséquence, d'induire un moindre catabolisme des AA excédentaires par rapport au besoin du poulet de chair ou de la poule pondeuse. L'excrétion (urinaire) d'azote s'en trouve alors réduite avec, pour impact pratique, une diminution de 6 à 10% des quantités d'azote dans les excréta pour chaque point de protéines en moins dans l'aliment (tableau 1). L'association d'une réduction de la teneur en protéines dans l'aliment et de la supplémentation en quelques AA essentiels peut donc contribuer efficacement à améliorer la durabilité des systèmes de production avicole en diminuant à la fois le recours à des matières premières riches en protéines et l'impact de l'azote des excréta sur l'environnement.

Les effets de la réduction du taux de protéines de l'aliment sur les performances et l'état sanitaire du poulet de chair ont fait l'objet de très nombreuses études au cours des 2 dernières décennies (Lemme et al., 2019; Star et al., 2021). Ces études ont tout d'abord mis en évidence que l'ampleur de la réduction du taux de protéines était limitée, d'une part, par l'apparition de nouveaux AA essentiels qui deviennent limitants ou co-limitants (arginine, isoleucine, etc.) ou d'interactions entre AA essentiels (Ospina-Rojas et al., 2017) et, d'autre part, par l'apport insuffisant de certains AA non essentiels (glycine; Star et al., 2021) dont les rôles restent cependant à préciser. Les études ont aussi montré qu'une réduction modérée du taux de protéines associée à une couverture des besoins en AA essentiels affecte très modérément les performances du poulet de chair et avec une variabilité élevée des réponses. Une méta-analyse des données de la bibliographie (tableau 1) indique que l'ingestion d'aliment et d'EMAn est légèrement accrue sans que la vitesse de croissance soit modifiée; il en résulte alors une légère détérioration de l'indice de consommation. Cette surconsommation d'EMAn est associée à une adiposité des carcasses sensiblement

plus élevée dans la mesure où le dépôt de protéines indiqué par la vitesse de croissance est inchangé et/ou a atteint le potentiel de dépôt maximal du poulet. De tels résultats suggèrent de poursuivre l'analyse des besoins en AA essentiels et non-essentiels du poulet lorsque le taux de protéines de l'aliment est réduit et en ayant recours à plus d'AA sous forme libre. Ils suggèrent aussi d'étudier les mécanismes de la régulation de la prise alimentaire afin d'éviter une consommation d'énergie excessive préjudiciable à l'indice de consommation et à la qualité de la carcasse. La réduction de la concentration en énergie de l'aliment tout en maintenant constant le rapport entre la lysine et l'énergie pourrait alors représenter une solution avec des régimes contenant plus de co-produits (riches en fibres) et/ou moins de matières grasses (Barekatin et al., 2021). Ceci conduirait aussi à ne plus formuler les aliments du poulet de chair pour une concentration en énergie immuable mais à l'adapter aux situations particulières d'aliments, par exemple, à faible teneur en protéines. Ceci pose enfin le problème de la représentativité des modes d'évaluation de l'énergie dans les aliments des volailles pour estimer le plus précisément possible la teneur en énergie "vraie" des aliments.

2. LES SYSTEMES ENERGETIQUES EN PRODUCTION AVICOLE

La description et l'analyse des systèmes énergétiques utilisés en production avicole a fait l'objet de plusieurs articles de synthèse, la plupart concernant presque exclusivement le système énergie métabolisable (EM) (Mateos et al., 2019; Wu et al., 2020). Comme l'indiquent ces auteurs, il demeure des confusions et un manque de standardisation des approches, tant dans les méthodes que dans leur application dans les tables de valeurs nutritionnelles ou dans la formulation des aliments. En effet, même si le concept de valeur EM vraie (TME) développé surtout en Amérique du Nord (Sibbald, 1982) est de moins en moins utilisé au profit du concept de valeur EM apparente (EMA) (Bourdillon et al., 1990), cette dernière fait l'objet de nombreuses variantes liées au type d'animal utilisé (poulet en croissance, coq adulte, poule pondeuse, etc.), au mode de présentation de l'aliment (farine vs miettes vs granulé), à l'éventuelle supplémentation en enzymes, etc. ou à la méthode de mesure elle-même (collecte totale des excréta ou marqueur) ou de calcul. Ces variantes affectent de façon parfois importante la valeur EMA de l'aliment (Noblet et al., 2022). Une complication supplémentaire vient de l'ajustement "historique" en production avicole de la valeur EMA pour un bilan azoté nul de l'animal (EMAn), en référence au modèle du coq adulte et à un objectif de standardisation des mesures entre des aliments ou des matières premières ayant des teneurs en matières azotées différentes. Dans ce contexte, les tables de valeurs nutritionnelles les plus récentes (CVB, 2018; INRAE, CIRAD et

AFZ, 2018; Rostagno et al., 2017) se sont relativement harmonisées en proposant à minima des valeurs EMAn chez le poulet en croissance, sans que toutefois les conditions pour les données d'origine ou pour leur application comme la granulation ou le stade physiologique soient précisées. On peut aussi penser que des valeurs obtenues chez le coq adulte plus élevées que chez le poulet en croissance (Cozannet et al., 2010), voire même des valeurs TME et surtout la non-correction pour un bilan azoté nul demeurent incluses dans ces tables et surtout chez les utilisateurs finaux. Ceci est illustré par une variabilité élevée des valeurs EMAn entre tables, même pour des ingrédients majeurs comme les céréales ou les principales sources de protéines, et ce indépendamment d'éventuelles différences de composition chimique de ces matières premières entre tables (Mateos et al., 2019). À titre d'exemple, les valeurs EMAn chez le poulet en croissance sont plus faibles (#-150 kcal/kg) pour le blé ou le maïs et légèrement plus élevées pour le tourteau de soja dans les Tables INRAE-CIRAD-AFZ que dans les tables brésiliennes (Rostagno et al., 2017) ou CVB (2018).

Il convient aussi de se poser la question de la pertinence de l'ajustement des valeurs EMA pour un bilan azoté nul. En effet, la quasi-totalité des volailles de chair ou les poules pondeuses fixent à minima 40% de l'azoté ingéré et en moyenne 60% pour les poulets de chair. De plus, ce taux de rétention est d'autant plus élevé que la teneur en azote dans l'aliment est abaissée (tableaux 2 et 3). Le modèle EMAn ne semble donc pas cohérent et représentatif pour la très grande majorité des situations de production avicole. C'est précisément pour remédier à cette situation que le modèle EMA a été proposé régulièrement (Lopez et Leeson, 2007; Abdollahi et al., 2021). La comparaison des valeurs EMA et EMAn indique qu'en toute logique, les valeurs EMA sont supérieures aux valeurs EMAn mais l'écart est nul pour les matières grasses, faible pour les céréales (2 à 4%) et il peut aller jusqu'à 15% pour les ingrédients riches en protéines comme le tourteau de soja (tableau 4). Pour un aliment complet, cet écart avoisinera 5%. La hiérarchie entre matières premières pour leur valeur énergétique diffèrera donc dans les systèmes EMA et EMAn.

En pratique, les valeurs EMA des matières premières sont généralement mesurées sur la matière première seule pour les céréales et sur une matière première incluse dans un aliment de référence pour les autres produits riches en protéines et/ou en fibres et/ou en matières grasses. Dans ce deuxième cas, la valeur EMA de la matière première est le plus souvent calculée par différence (Noblet et al., 2022). Toutefois, cette valeur EMA est directement dépendante de l'excrétion azotée associée à la présence de la matière première dans l'aliment et donc de la quantité et la qualité des protéines de cet

aliment, relativement au besoin de l'animal. En d'autres termes, il peut exister autant de valeurs EMA pour une matière première que de situations nutritionnelles dans lesquelles elle est testée. Ceci est particulièrement important pour les sources de protéines. C'est pourquoi et comme pour le porc (Noblet et al., 2004), il serait nécessaire de standardiser les valeurs EMA (EMAs) pour un coefficient de rétention azotée proche de ce qui est observé dans les conditions pratiques pour un aliment complet. La méthode de calcul de EMAs consistant schématiquement à ajouter l'énergie de l'azote qui ne serait pas excrété à la valeur EMAN de l'aliment est décrite plus en détail par Cozannet et al. (2010) et Noblet et al. (2022). Un coefficient de rétention azotée de 60% est suggéré, au moins pour le poulet de chair; une valeur de 50% peut aussi être un compromis commun au poulet de chair et à la poule pondeuse (tableau 3). Tout en étant du même ordre de grandeur que les valeurs EMA, les valeurs EMAs sont harmonisées entre elles et surtout indépendantes des conditions expérimentales, voire des méthodes de calcul, avec lesquelles elles ont été mesurées. Comme pour EMA, l'écart entre les valeurs EMAs et EMAN varie selon la teneur en azote des matières premières (tableau 5). Enfin, sur un plan pratique, elles peuvent être calculées directement à partir des valeurs EMAN de la bibliographie ou des tables de valeurs nutritionnelles.

Les études permettant la mise au point d'un système EN pour les volailles, à savoir une ou des équations de prédiction de la valeur EN (Noblet et al., 2022), ont été peu nombreuses jusqu'aux années 2000 (Fraps, 1946; Schiemann et al., 1972; de Groote, 1974) et n'ont pas été menées avec un modèle animal représentatif du poulet de chair contemporain. Ce relatif manque de connaissances adaptées à la situation actuelle ainsi que le faible nombre d'ingrédients utilisés dans les aliments des volailles expliquent la non-utilisation d'un système EN en production avicole (Pirgozliev et Rose, 1999). Pourtant, les ingrédients deviennent plus diversifiés et plus variables et, surtout, plusieurs études réalisées au cours des 2 dernières décennies (Carré et al., 2014; Cerrate et al., 2019; Barzegar et al., 2019; Wu et al., 2019) et d'autres en cours, toutes sur le poulet de chair (ou la poule pondeuse), permettent ou permettront l'adoption d'un système EN en production avicole et son évaluation relativement aux systèmes EMAN et EMA (ou EMAs). L'analyse approfondie des derniers travaux publiés sur le poulet de chair (Noblet et al., 2022) conduit à préférer aujourd'hui les équations proposées par Wu et al. (2019), les conclusions des études de Carré et al. (2014) et Wu et al. (2019) étant proches. En particulier et comme le montraient les travaux plus anciens de Schiemann et al. (1972) ou de Groote (1974), le rendement d'utilisation de l'EMA en EN est accru avec l'augmentation du taux de matières grasses dans l'aliment et diminué lorsque le taux de

protéines est plus élevé (tableau 5). Enfin, les résultats comparables obtenus chez la poule pondeuse (Barzegar et al., 2019) permettent, au stade actuel des connaissances, de recommander l'application à la poule pondeuse d'un système EN mis au point chez le poulet de chair.

3. REDUCTION DE LA TENEUR EN PROTEINES DE L'ALIMENT ET EVOLUTION DES SYTEMES ENERGETIQUES

L'analyse des systèmes énergétiques susceptibles d'être utilisés pour les volailles suggère 1/ des différences importantes de hiérarchie de valeurs entre EMAN et EMA (ou EMAs) liées à la teneur en protéines de l'aliment et 2/ des rendements de transformation de l'EMA en EN liés à la fois à la teneur en protéines (effet négatif) et à la teneur en matières grasses (effet positif). Ces effets observés sur un aliment complet sont exacerbés dans le cas des matières premières ayant des teneurs extrêmes, soit en matières grasses, soit en protéines (tableau 6). Ainsi, le système EMAN, encore largement utilisé en pratique, pénalise les ingrédients riches en protéines, relativement au système EMAs qui reflète au mieux l'utilisation vraie de l'énergie sur la base des pertes fécales et urinaires. Si l'on prend ensuite en compte l'extra-chaaleur liée à la transformation de l'EMAs en EN, la valeur EN de l'huile végétale est très nettement accrue alors que celle du tourteau de soja est abaissée. Au final et exprimées relativement à la valeur énergétique d'un régime conventionnel, les valeurs EMAN et EN hiérarchisent de la même façon les céréales (riches en amidon) et leurs co-produits ainsi que les produits riches en protéines. Mais les sources de matières grasses sont très pénalisées dans les systèmes EMA relativement à leur valeur EN. La comparaison des valeurs EMAs et EN indique des hiérarchies affectées à la fois par les protéines et les matières grasses. La valeur EMAs représente donc en soi un progrès modéré dans la recherche du meilleur estimateur de la valeur "vraie" représenté par la teneur en EN. Toutefois, elle constitue un passage obligé dans le calcul de la valeur EN à partir de la formule de Wu et al. (2019), la valeur EMA devant être standardisée pour une situation nutritionnelle représentative de la pratique et dans laquelle les protéines de toutes les matières premières de l'aliment sont fixées avec un rendement de 50 à 60%. Enfin, la pénalité trop forte apportée par les systèmes EMAN ou EMAs pour les sources de matières grasses justifie presque à elle seule l'utilisation d'un système EN en production avicole.

Les données des tableaux 2 et 3 suggèrent que la diminution de l'ingestion azotée associée à la diminution du taux de protéines de l'aliment entraîne une diminution quasi identique de l'excrétion d'azote. Sur la base d'un coefficient de digestibilité iléale de l'azote inchangé et égal à 80%, la réduction de l'azote

excrété est donc liée pour au moins 80% à une moindre excrétion urinaire et traduit un catabolisme réduit des protéines de l'aliment (Liu et al., 2021). Ces données montrent aussi un coefficient de rétention azotée qui s'accroît en moyenne de 3% par diminution de 1 point de la teneur en protéines, soit une valeur EMAs de ces protéines supérieure d'environ 8 kcal par kg pour un aliment passant de 21 à 20% de protéines ($200/6.25 \times 0.03 \times 8.2$; Noblet et al., 2022). De plus, l'excrétion moindre d'acide urique permet aussi d'économiser de l'énergie nécessaire à sa synthèse; van Milgen (2021) l'estime à environ 6.2 kcal par g de N sous forme d'acide urique qui s'ajoutent à l'énergie de l'acide urique lui-même (8.2 kcal/g de N), soit environ 5 kcal ($6.2 \times 80\%$) par g de N dans l'aliment. Sur le principe, ce coût énergétique serait à attribuer à la transformation de l'EMAs en EN. Au total, ce calcul montre que 1/, comme illustré dans le tableau 6, la valeur énergétique d'un aliment ou d'une matière première sur sa base EMAs doit être adaptée au coefficient de rétention azotée de l'aliment et 2/, dans le cas précis d'une diminution de la teneur en protéines de l'aliment, le coefficient de rétention azotée s'accroît avec une valorisation supplémentaire des protéines de l'aliment, valorisation qui n'est pas prise en compte avec un système EMAn qui sous-estimerait alors l'énergie apportée par cet aliment. Ce calcul contribue à expliquer l'adiposité légèrement accrue des poulets de chair recevant des aliments à teneur réduite en protéines ou, à l'inverse, l'adiposité réduite pour les aliments avec une teneur en protéines plus élevée. Les différences de rendement d'utilisation de l'EMAs en EN liés à la réduction du taux de protéines et les variations associées des teneurs en amidon, matières grasses et fibres sont également susceptibles de contribuer à l'adiposité supérieure. Mais des travaux complémentaires sur ce sujet nous semblent nécessaires, d'autant que certains travaux ne montrent pas de réduction de la production de chaleur avec la réduction du taux de protéines (Noblet, 2015). De plus, en lien avec les différences de valeur énergétique entre matières premières selon les systèmes d'évaluation, il existe probablement des effets importants du mode d'évaluation de l'énergie des aliments sur la variation de la composition centésimale et en nutriments des aliments complets. C'est précisément l'objet de la dernière partie de ce texte.

4. IMPACT DU SYSTEME ENERGETIQUE SUR LA FORMULATION DES ALIMENTS VOLAILLES

Comme indiqué ci-dessus, il existe plusieurs systèmes ou modes d'évaluation de l'énergie des aliments pour les volailles. Par ailleurs, plusieurs éléments suggèrent la nécessité et la faisabilité d'une réduction de la teneur en protéines des aliments en supplémentant en AA essentiels. Afin d'analyser l'impact du système d'évaluation de l'énergie sur la

composition des aliments lorsque la teneur en protéines est abaissée, des essais de formulation au moindre coût ont été effectués dans plusieurs contextes de teneur en protéines de l'aliment et de prix des sources majeures de protéines. Tout d'abord, un aliment de base ou de "passage" pour le poulet de chair en croissance a été défini à partir des matières premières suivantes: blé (25.0%), maïs (26.8%), tourteau de soja (23.1%), tourteau de colza (3.0%), pois (3.0%), son de blé (3.0%), drèches de maïs (5.0%), graine de soja cuite (3.2%), huile végétale (4.0%) et des AA industriels (0.60% de lysine + méthionine + thréonine). Ses teneurs en protéines et en lysine digestible sont fixées à respectivement 20.5% et 1.08%; le profil en AA essentiels relativement à la lysine respecte les valeurs habituelles (Belloir et al., 2017). Enfin, les teneurs en phosphate monocalcique, carbonate de calcium, sel, bicarbonate de sodium et premix de cette formule et de toutes les formules testées sont fixes (total: 3.5%) et permettent de couvrir les besoins en minéraux et vitamines dans toutes les situations. Les valeurs EMAn, EMAs et EN de cet aliment de "passage" sont 2850, 3012 et 2275 kcal/kg et sa teneur en matières grasses est 7.1%. Les caractéristiques chimiques et les valeurs nutritionnelles (énergie et AA) des matières premières choisies sont issues des Tables INRAE-CIRAD-AFZ (2017). Pour définir les prix de référence des matières premières, la moyenne des valeurs mensuelles rapportées dans la "Note de conjoncture aliment" de l'IFIP sur janvier 2020-septembre 2021 a été retenue. Des essais de formulation au moindre coût ont alors été conduits à partir de toutes les matières premières utilisées dans l'aliment de "passage" (plus tryptophane et valine libres) pour, d'une part, définir un aliment de référence dans chaque système énergétique (EMA, EMAs et EN) ayant les caractéristiques nutritionnelles de l'aliment de "passage" et, d'autre part, évaluer l'impact du taux de protéines de l'aliment (19.0 à 22.5%; pas de 0.5%), du prix des sources de protéines (-30, -15, +15 et + 30% du prix de référence pour les tourteaux de soja et colza et la graine de soja) pour 2 taux de protéines extrêmes, de la concentration en énergie de l'aliment (-150 à +150 kcal EMAn/kg, -160 à +160 kcal EMAs et -120 à +120 kcal EN, relativement au régime de référence; pas de 50 kcal d'EMAn) et du prix des sources de matières grasses (-50, -25, +25 et +50% du prix de référence; pour huile végétale et graine de soja) pour 2 concentrations énergétiques opposées. Au total, 31 formules dont la formule de référence ont été calculées pour chaque système. Dans ces essais, le rapport lysine digestible sur EMAn ou EMAs ou EN est constant dans chaque système (et au-dessus du besoin), l'équilibre entre les AA essentiels est préservé et le prix du blé, du maïs, des drèches de maïs, du son de blé, des minéraux et des AA de synthèse sont considérés comme constants. Des contraintes de maxi d'incorporation pour quelques matières premières (8% d'huile, 10% de

drèches ou son de blé), de mini pour le blé et le maïs (10%) ou de maxi de certains nutriments (11% de matières grasses, 6% de cellulose brute) ont été introduites. Une sélection et une simplification des résultats est présentée au tableau 7.

Probablement en lien avec le prix de référence retenu et la concurrence directe avec le tourteau de soja et l'huile végétale, la graine de soja n'entre pas dans les formules testées. Le pois est aussi systématiquement exclu. Le tourteau de colza et le son de blé entrent à des niveaux très faibles en moyenne. Ainsi, pour les 31 formules testées, le tourteau de soja représente 100% des tourteaux dans les systèmes EMAN et EMAs et 98% dans le système EN. De même, le son de blé ne contribue qu'à 6% des co-produits pour l'ensemble des formules et des systèmes. Enfin, les 2 céréales sont introduites à des taux comparables dans l'ensemble des formules, même si on assiste à des phénomènes de bascule entre les 2 céréales en fonction des contraintes. La comparaison des formules selon les systèmes ne met pas en évidence d'écarts importants de taux d'introduction des groupes de matières premières entre systèmes. Sur l'ensemble des 31 formules, on note toutefois un niveau d'introduction légèrement plus élevé d'huile végétale et de co-produits et plus faible de céréales avec le système EN qu'avec les systèmes EMAN et EMAs. Ce résultat est en accord avec la valeur relative des matières grasses plus élevée dans le système EN. Il faut aussi noter que le protocole des essais de formulation impliquait un niveau bloqué de protéines avec, pour conséquence, une atténuation probable de la variabilité des formules en fonction du système d'évaluation de l'énergie. Des essais de formulation complémentaires (résultats non inclus dans le tableau 7) réalisés en fixant un maxi de teneur en protéines (20.5%) mettent en évidence que le coût est minimisé à des teneurs en protéines de 18.8% dans les systèmes EMAN, EMAs et EN; ce minimum n'est pas modifié dans le système EMAN et s'accroît à 19.7 et 19.9% dans les systèmes EMAs et EN aux prix de protéines les plus faibles. A l'inverse, le taux de protéines diminue (16.4%) lorsque les protéines sont chères et dans les 3 systèmes. Il faut enfin noter que, sur l'ensemble des formules, les aliments formulés avec les systèmes EMAN et EMAs ont une valeur EN plus faible (-0.4%), sans que le coût par Mcal d'EN soit affecté (0.135€/Mcal d'EN).

L'analyse plus approfondie de l'effet du taux de protéines montre qu'avec son abaissement de 22.5 à 19.0 et quel que soit le système énergétique utilisé, on diminue les niveaux d'incorporation des tourteaux et d'huile végétale et on accroît fortement les niveaux d'incorporation des céréales et des acides aminés. Toutefois, aux taux de protéines les plus faibles, le niveau de tourteaux s'accroît et celui des co-produits diminue afin de couvrir les contraintes en acides aminés essentiels non disponibles sous forme libre

(arginine, par exemple). Il faut aussi noter que seules la lysine, la méthionine et la thréonine sont incluses à des niveaux significatifs, la valine n'entrant qu'aux 2 taux de protéines les plus bas. Enfin, nos résultats montrent que la formulation sur une base EMAN conduit à des aliments ayant une teneur en EN qui diminue lorsque la teneur en protéines diminue (-15 kcal/kg entre les teneurs extrêmes) alors qu'elle augmente lorsque les aliments sont formulés avec le système EMAs (+10 kcal/kg entre les extrêmes). Enfin, le coût matières premières des régimes s'abaisse avec la réduction de la teneur en protéines sans qu'il y ait de différence entre systèmes du coût de la Mcal d'EN.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse des données de la bibliographie sur les effets de la réduction de la teneur en protéines des aliments du poulet de chair indique la faisabilité technique si elle est associée à une supplémentation en AA essentiels afin que leurs apports dans l'aliment soient maintenus. Toutefois, l'ampleur de la diminution est limitée par l'indisponibilité d'AA essentiels secondaires mais surtout par une tendance à l'accroissement de l'adiposité de l'animal et une détérioration concomitante de l'efficacité alimentaire. Outre la nécessité de poursuivre des travaux sur les besoins en AA essentiels et non-essentiels chez le poulet, le mode d'évaluation de l'énergie pourrait représenter un facteur limitant dans la mise en œuvre des aliments à teneur réduite en protéines. L'analyse des systèmes d'évaluation de l'énergie pour les volailles (EMA et EN) montre que la hiérarchie entre matières premières est affectée par le mode d'évaluation qui touche, d'une part, les sources de protéines et, d'autre part, les sources de matières grasses, ces dernières étant mieux valorisées dans le système EN. Cependant et de façon surprenante et inexpliquée, des essais de formulation réalisés avec des hypothèses de prix et des contraintes nutritionnelles représentatives des conditions pratiques ne permettent pas de mettre en évidence l'impact sur la composition des régimes de ces différences de hiérarchie entre matières premières selon le système énergétique, notamment lorsque la teneur en protéines est abaissée. Des recherches sont alors nécessaires pour proposer un système énergétique pour les volailles qui soit robuste et fiable et qui devrait être basé sur la valeur EN des aliments, valeur qui est en principe le meilleur estimateur de la valeur énergétique "vraie" des aliments. Une attention particulière sera à apporter à l'effet d'un abaissement progressif de la teneur en protéines et d'une supplémentation de plus en plus élevée en AA industriels, dans un contexte de réduction des rejets azotés dans les excréta et d'amélioration de la durabilité des élevages avicoles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdollahi R., Wiltafsky-Martin M., Ravindran V., 2021. *Animals*, (11), 2174, doi: org/10.3390/ani11082174.
- Barekatain R., Romero L., Sorbara J.O., Cowieson A., 2021. *Anim. Nutr.*, (7), 430-439
- Barzegar S., Wu. S., Noblet J., Choct M., Swick R., 2019. *Poult. Sci.*, (98), 5746-5758
- Belloir P., Méda B., Lambert W., Corrent E., Juin H., Lessire M., Tesseraud S., 2017. *Animal*, (11), 1881-1889.
- Bourdillon A., Carre B., Conan L., Duperray J., Huyghebaert G., Leclercq B., Lessire M., McNab J., Wiseman J., 1990. *Br. Poult. Sci.*, (31), 557-565
- Carré B., Lessire M., Juin H., 2014. *Animal*, (8), 1395-1401.
- Cappelaere L., Le Cour Grandmaison J., Martin N., Lambert W., 2021. *Front. Vet. Sci.*, (8), 689259, doi: 10.3389/fvets.2021.689259
- Cerrate S., Ekmay R., England J., Coon C., 2019. *Poult. Sci.*, (98), 3994-4007
- Chrystal P., Moss A., Khoddami A., Naranjo V., Selle P., Liu S., 2020. *Poult. Sci.*, (99), 505-516
- Cozannet P., Lessire M., Gady C., Metayer J., Primot Y., Skiba F., Noblet J., 2010. *Poult. Sci.*, (89), 2230-2241.
- CVB, 2018. CVB Feed Table 2018: Chemical composition and nutritional values of feedstuffs. Wageningen, The Netherlands.
- De Groote, 1974. *Br. Poult. Sci.*, (15), 75-95
- Frappe G.S., 1946. Composition and productive energy of poultry feeds and rations. College Station: Texas Agricultural Experiment Station Bulletin
- INRAE-CIRAD-AFZ, 2019. INRAE-CIRAD-AFZ Feed tables: composition and nutritive values of feeds for cattle, sheep, goats, pigs, poultry, rabbits, horses and salmonid. <https://feedtables.com/>
- Kidd M., Maynard C., Mullenix G., 2021. *J. Anim. Sci. Biotech.*, (12), 45
- Lemme A., Hiller P., Klahsen M., Taube V., Stegemann J., Simon I., 2019. *J. Appl. Poult. Res.*, (28), 867-880.
- Liu S., Macelline S., Chrystal P., Selle P., 2021. *J. Anim. Sci. Biotech.*, (12), 20
- Mateos G., Camara L., Fondevila G., Lazaro R., 2019. *J. Appl. Poult. Res.*, (28), 506-525
- Meda B., Belloir P., Narcy A., Wilfart A., 2019. Presented at 22nd European symposium on Poultry Nutrition, Gdansk, Pologne, 12 pages
- Noblet J., Sève B., Jondreville C., 2004. In: Tables of composition and nutritional value of feed materials: pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish (Sauvant D., Perez J.M., Tran G. edit.), Wageningen, The Netherlands and Paris, France: Wageningen Academic Publishers and INRA, pp. 25-35
- Noblet J., 2015. In: 20th European Symposium on Poultry Nutrition, 24-27 August 2015, Prague, pp. 48-56.
- Noblet J., Wu S.B., Choct M., 2022. *Anim. Nutr.* (8), in press, doi: org/10.1016/j.aninu.2021.06.015
- Ospina-Rojas I.C., Murakami A.E., Duarte C.R.A., Nascimento G.R., Garcia E.R.M., Sakamoto M.I., Nunes R.V., 2017. *Poult. Sci.*, (96), 914-922
- Pirgozliev V., Rose S., 1999. *Worlds Poult. Sci. J.*, (55), 23-36.
- Rostagno H., Albino L., Hannas M., Donzele J., Sakomura N., Perazzo F., Saraiva A., Teixeira de Abreu M., Rodrigues P., de Oliveira R., 2017. In: Brazilian tables for poultry and swine: Feedstuff composition and nutritional requirements. 4th ed., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brazil
- Star L., Tesseraud S., van Tol M., Minussi I., Corrent E., Lambert W., 2021. *Anim. Nutr.*, (7), 472-480
- Schiemann R., Nehring K., Hoffmann L., Jentsch W., Chudy A., 1972. In: Energetische futterbewertung und energienormen. Berlin, Germany: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag
- Sibbald I., 1982. *Can. J. Anim. Sci.*, (62), 983-1048.
- Tables INRAE-CIRAD-AFZ, 2017. <https://feedtables.com/>
- Van Milgen J., 2021. *Animal*, (15), 100213
- Wu S.B., Swick R.A., Noblet J., Rodgers N., Cadogan D., Choct M., 2019. *Poult. Sci.*, (98), 1222-1234
- Wu S.B., Choct M., Pesti G., 2020. *Poult. Sci.* (99), 385-406

Tableau 1. Influence d'une réduction de la teneur en protéines de l'aliment sur les performances du poulet de chair (METEX NOOVISTAGO, communication personnelle)¹

Critère	Variation, % par 1% de réduction de MAT	Niveau de signification
Azote excrété ²	-8	-
Ingestion d'aliment	+0.80	0.001
Ingestion d'EMAn	+0.71	0.007
Gain de poids	0	0.43
Indice de consommation	+0.60	0.001
Gras abdominal	+4.9	0.001

¹ Résultats d'une méta-analyse portant sur 28 expériences réalisées sur le poulet de chair entre 14 et 35 jours d'âge; exprimés en % du résultat obtenu avec l'aliment "témoin" de chaque essai contenant le taux le plus élevé en protéines; les apports d'acides aminés essentiels sont couverts pour tous les aliments de chaque étude; les valeurs EMAn des aliments sont recalculées à partir de leur composition centésimale et des valeurs EMAn matières premières des Tables INRAE-CIRAD-AFZ (2019)

² Données moyennes de la bibliographie (Cappelaere et al., 2021)

Tableau 2. Influence de la teneur en protéines de l'aliment sur le bilan azoté chez le poulet entre 21 et 35 jours d'âge (adapté de Belloir et al., 2017)¹

Teneur en protéines aliment, %	19	18	17	16	15
Aliment ingéré, g	2430	2477	2472	2459	2528
Bilan azoté, g					
Ingéré	73.9	71.3	67.2	63.0	60.7
Excrété	31.0	27.9	23.9	21.1	17.8
Fixé	42.9	43.4	43.3	41.9	42.9
Coefficient de rétention de l'azote, %	58	61	64	66	70

¹ La quantité d'azote fixé est estimée à partir du gain de poids vif et d'une teneur en azote du gain de poids vif de 29 g par kg

Tableau 3. Influence de la teneur en protéines de l'aliment sur le bilan azoté chez le poulet en croissance et la poule pondeuse

Stade physiologique	Poulet en croissance ¹		Poule pondeuse ²	
MAT aliment, % MS	21.2	25.1	16.9	22.1
Poids vif, g	1650	1680	2033	2026
Aliment ingéré, g MS/j	150	154	90	91
Bilan azoté, g/j/animal				
Ingéré	5.1	6.2	2.5	3.2
Fixé ³	3.4	3.6	1.2	1.2
Coefficient de rétention de l'azote, %	66	59	49	38

¹ A partir de Wu et al. (2019) chez des poulets de 25-28 jours d'âge; moyenne de 8 aliments (8 observations par aliment) pour chacun des niveaux d'apports de protéines.

² A partir de Barzegar et al. (2019) chez des poules pondeuses; moyenne de 9 et 7 aliments (8 observations par aliment) pour respectivement les niveaux bas et haut de protéines; N fixé chez la poule pondeuse inclut les quantités fixées au niveau de l'œuf celles fixées ou mobilisées au niveau corporel

³ La quantité d'azote fixé est la différence entre la quantité d'azote ingérée et celle mesurée dans les excréta

Tableau 4. Valeurs EMA et EMAn de quelques matières premières pour le poulet de chair¹

Matière premières	n	Rétention azotée %	EMA MJ/kg	EMAn MJ/kg	EMAn % EMA
Céréales	6	42.1	14.48	14.19	98.0
Tourteau de soja	28	46.5	9.32	8.07	86.5
Graines de soja	16	45.8	13.31	12.39	93.4
Tourteau de colza	9	49.6	8.29	7.42	89.6
DDGS de maïs	9	51.9	12.16	11.33	93.2

¹ A partir de Abdollahi et al. (2021). Mesures réalisées sur des poulets de 25-28 jours par collecte totale des excréta: mesure directe pour les céréales (blé, orge, maïs et sorgho) et mesure par différence pour les sources de protéines. Pour chaque matière première, il s'agit de plusieurs échantillons de la matière première (céréales et tourteau de soja) ou d'un seul échantillon ayant subi différents traitements hydro-thermiques (graine de soja, tourteau de colza, DDGS).

Tableau 5. Prédiction du rendement de l'énergie métabolisable (EMA) en énergie nette (EN) et de la teneur en EN des aliments chez le poulet en croissance (à partir de Wu et al., 2019; 135 observations)

Equation	ETR
EN/EMA, % = $79.2 - 0.26 \times \text{MAT} + 0.26 \times \text{MG}$	1.50
EN, MJ/kg MS = $0.781 \times \text{EMA} - 0.028 \times \text{MAT} + 0.029 \times \text{MG}$	0.21

Tableau 6. Valeur énergétique pour le poulet de quelques matières premières selon le système d'évaluation¹

	Valeurs énergétiques				EMAn,	EN60,
	EB	EMAn	EMA60	EN60	%EMA60	%EMA60
Régime de référence, kcal/kg ²	4136	2939	3087	2335	95.2	76
Valeur énergétique relative, % ³						
Huile végétale	227	306	292	339	100.0	88
Blé	95	101	99	99	97.1	76
Maïs	97	109	106	109	98.1	77
Son de blé	98	55	57	55	92.9	73
Tourteau de soja	102	77	85	75	85.8	66

¹ Données énergie brute (EB) et EMA pour un bilan azoté nul (EMAn) selon les Tables INRAE-CIRAD-AFZ (2019); EMA60 est calculé à partir de EMAn et d'un bilan azoté égal à 60% de l'azote de l'aliment (Cozannet et al., 2010; Noblet et al., 2022); EN60 est calculé selon l'équation de Wu et al. (2019) (tableau 5) avec EMA60 comme estimateur de EMA

² Régime contenant 31% de blé, 31% de maïs, 6% de son de blé, 4% d'huile de soja, 25% de tourteau de soja et 3% de minéraux et vitamines (CMV); les teneurs en matière sèche des matières premières sont de 100% pour le CMV et l'huile et 90% pour les autres matières premières

³ Valeur énergétique en % de la valeur énergétique du régime de référence ; toutes les valeurs énergétiques sont exprimées relativement au produit frais et pour leurs teneurs en matière sèche retenues pour le régime

Tableau 7. Influence du système énergétique sur les résultats de la formulation d'un aliment croissance pour le poulet de chair; interactions avec la teneur en protéines, le prix des protéines et la concentration en énergie

Système	Régime ¹	MAT,%	Energie, kcal/kg			Ingrédients, % ²					Coût €/T
			EMAn	EMAs	EN	Cér	Tourtx	CPs	Huile	AA	
EMAn	Er/Pr/Tr/Hr	20.5	2850	3008	2264	57.8	24.5	10.0	3.5	0.70	305.0
	Er/P-/Tr/Hr	19.0	2850	3001	2257	64.5	27.3	2.0	2.0	0.76	298.5
	Er/P+/Tr/Hr	22.0	2850	3024	2272	52.9	29.1	10.0	4.1	0.48	314.4
	Er/P-/T+/Hr	19.0	2850	3001	2257	66.1	27.2	0.0	2.4	0.78	331.3
	Er/P-/T-/Hr	19.0	2850	3000	2255	65.4	28.4	0.0	2.0	0.73	264.9
	E-/Pr/Tr/Hr	19.8	2750	2907	2173	61.6	22.9	10.0	1.2	0.67	286.4
	E+/Pr/Tr/Hr	21.2	2950	3118	2364	53.5	26.9	10.0	5.5	0.70	323.6
	n=31 ³	20.6	2850	3014	2267	57.3	27.1	8.2	3.3	0.63	305.3
EMAs	Er/Pr/Tr/Hr	20.5	2850	3012	2268	57.8	24.5	10.0	3.5	0.70	304.9
	Er/P-/Tr/Hr	19.0	2861	3012	2267	64.2	27.3	2.0	2.2	0.76	300.0
	Er/P+/Tr/Hr	22.0	2838	3012	2260	53.1	29.0	10.0	3.9	0.48	312.8
	Er/P-/T+/Hr	19.0	2861	3012	2267	65.9	27.2	0.0	2.6	0.78	332.8
	Er/P-/T-/Hr	19.7	2856	3012	2262	63.0	30.5	0.0	2.4	0.60	266.2
	E-/Pr/Tr/Hr	19.8	2749	2906	2173	61.7	22.9	10.0	1.2	0.67	286.3
	E+/Pr/Tr/Hr	21.2	2950	3118	2363	53.5	26.9	10.0	5.5	0.70	323.6
	n=31 ³	20.6	2849	3013	2266	57.2	27.1	8.2	3.3	0.63	305.2
EN	Er/Pr/Tr/Hr	20.5	2857	3019	2275	57.7	24.5	10.0	3.6	0.70	305.8
	Er/P-/Tr/Hr	19.0	2870	3020	2275	64.0	27.4	2.0	2.3	0.76	301.0
	Er/P+/Tr/Hr	22.0	2854	3028	2275	52.8	29.1	10.0	4.1	0.48	314.9
	Er/P-/T+/Hr	19.0	2869	3020	2275	65.8	27.3	0.0	2.7	0.78	333.9
	Er/P-/T-/Hr	19.9	2862	3019	2275	57.6	25.7	10.0	2.5	0.70	267.3
	E-/Pr/Tr/Hr	19.8	2773	2930	2195	61.2	23.0	10.0	1.7	0.67	289.4
	E+/Pr/Tr/Hr	21.2	2941	3109	2355	53.7	26.8	10.0	5.3	0.70	322.4
	n=31 ³	20.6	2857	3022	2275	56.2	27.1	9.0	3.5	0.63	306.5

¹ Er, E- et E+ pour concentrations en énergie de référence, réduite et accrue; Pr, P- et P+ pour teneur en énergie de référence, réduite et accrue; Tr, T- et T+ pour prix de référence, réduit et élevé des tourteaux; Hr pour prix de référence de l'huile ² Cér: blé + maïs, Tourtx: tourteaux de soja et colza, CPs: drèches de maïs + son de blé

³ Ensemble des formules testées (voir texte)