

POURQUOI ET COMMENT INTEGRER LA BALANCE ELECTROLYTIQUE DANS LES CRITERES DE FORMULATION DES ALIMENTS POUR MONOGASTRIQUES

Quiniou Nathalie¹, Narcy Agnès²

¹ IFIP-Institut du Porc, La Motte au Vicomte, BP 35104, 35651 LE RHEU cedex

² UMR BOA, INRA - Université de Tours, 37380 NOUZILLY

nathalie.quiniou@ifip.asso.fr

agnes.narcy@inra.fr

RÉSUMÉ

L'évolution des conditions de production, d'une part, avec des animaux sélectionnés pour être de plus en plus performants et, d'autre part, la prise en compte de contraintes multiples (économiques, environnementales et sociétales) conduisent à formuler des aliments au plus près des besoins classiques des animaux (énergie, acides aminés essentiels, minéraux) tout en réduisant l'incorporation de certaines matières premières. Ainsi, la moindre incorporation de soja permet de réduire les rejets azotés par une baisse du taux de matières azotées totales de l'aliment, mais conduit également à une diminution de son bilan électrolytique (BE). Ce critère permet d'évaluer le caractère acidogène de l'aliment, qui influence l'équilibre acido-basique de l'animal et peut altérer ses performances. Les monogastriques, notamment le porc et les espèces avicoles, étant particulièrement sensibles au risque d'acidose, de nombreuses études ont porté sur l'étude de la relation entre le BE et le niveau de performance. Un aliment fortement acidogène ($BE < 0$ mEq/kg) peut être recherché de façon transitoire, par exemple en *peri-partum* chez la truie. Mais à plus long terme, un BE bas accentue le risque de déminéralisation osseuse et provoque une chute de l'ingestion spontanée d'aliment quelle que soit l'espèce. En outre, chez les reproducteurs, il entraîne une baisse de la production de lait (truie) ou de la qualité de la coquille (poule pondeuse). Chez les animaux en croissance, la vitesse croissance est pénalisée (porc et poulet) voire l'efficacité alimentaire (poulet) et l'adiposité de la carcasse (porc et poulet). Des plages de valeurs de BE sont suggérées selon l'espèce et le stade de production sur la base d'une revue des travaux disponibles dans la bibliographie.

ABSTRACT

Accounting for the electrolytic balance in dietary formulation for monogastric species

Genetic selection for high performing farm animals and expectations for a better sustainability in terms of economic return, reduced environmental impact, and improved animal welfare strongly influence conditions of animal production. Feeding strategies implemented nowadays are based on diets formulated for a better adequacy between nutrient (energy, amino acids, and minerals) and requirements, while reducing the use of some feedstuffs. Hence, the lower incorporation rate of soybean allows for reducing the N output per animal through reduced dietary crude protein content, but it induces a decrease in dietary electrolytic balance (DEB) also. This criterion is used to characterise the acidogenic property of the diet that influences the acid-basic balance of the animal and may impair its performance. Monogastric species such as pig and poultry are particularly exposed to acidosis risk, and numerous studies focused on the effect of DEB. A low DEB diet can be transitionally interesting in some situation, such as around sow farrowing ($DEB < 0$ mEq/kg). However, a long term use should be avoided as it induces a decrease in spontaneous feed intake and it may alter the mineralization level of bones, whatever the species considered. In reproducing animals, a low DEB is associated with a reduced milk production (sow) and egg shell quality (laying hen). In growing animals, the growth rate (pig and poultry) and eventually the feed efficiency (poultry) and carcass fatness (pig and poultry) are reduced with such a diet. Based on a review of literature, different ranges of DEB are proposed for different species and physiological stages.

INTRODUCTION

L'alimentation est une discipline sollicitée en permanence pour améliorer les performances de l'élevage. De tout temps, les niveaux d'apports nutritionnels ont été remis en cause par les progrès de la sélection génétique, puisqu'il s'agissait de permettre à des animaux de plus en plus performants d'approcher leur potentiel de production.

Dans les années 90 a émergé l'impératif de revoir la formulation des aliments en réponse aux pressions sociétales vers une réduction de l'impact environnemental des productions animales. Plus récemment, la prise en compte du bien-être animal, des conditions de logement, de la nécessité d'économiser les ressources protéiques... ont accentué la diversification des formules alimentaires. Or, en s'éloignant d'une situation de référence, stable et bien maîtrisée, il devient nécessaire de compléter l'éventail de critères utilisés en formulation pour définir les caractéristiques de l'aliment.

Le bilan électrolytique (BE) est un des composants de la formule ayant attiré l'attention suite aux recherches de solutions nutritionnelles pour baisser les rejets azotés. Ainsi, chez le porc, la baisse de la teneur en matières azotées totales (MAT) permet de réduire considérablement les rejets azotés sans modifier les performances des animaux (Dourmad et al., 1993) à condition de changer de système énergétique (énergie nette au lieu de énergie digestible), de mode d'expression des apports en acides aminés essentiels (sur la base de leur digestibilité iléale standardisée et non de leur teneur totale) et du respect des équilibres entre ces derniers et l'acide aminé limitant primaire qu'est la lysine. Or, la baisse de la MAT dans les aliments est réalisée en diminuant l'utilisation de sources de protéines telles que le tourteau de soja, ce qui conduit à des aliments plus acidogènes.

Pour les espèces avicoles, la notion de balance électrolytique suscite un intérêt plus particulier depuis les années 70 en lien avec les études physiologiques portant sur la formation de la coquille d'œuf. Cette dernière est constituée majoritairement de carbonate dont le parcours métabolique interfère directement avec l'équilibre acido-basique. Aujourd'hui, la volonté de réduire le niveau protéique des aliments chez les volailles grâce à l'utilisation d'acides aminés de synthèse (Belloir et al., 2017) sur la base d'un profil optimisé impose de reconsidérer le BE des aliments. L'objet de cet article est de synthétiser les connaissances disponibles dans la littérature établie sur le BE chez deux types de monogastriques, i.e. le porc et la volaille.

1. L'HOMÉOSTASIE ACIDO-BASIQUE

1.1. Electrolytes et homéostasie acido-basique

L'eau constitue les deux tiers de l'organisme. Elle se répartit entre le compartiment intracellulaire et le

compartiment extracellulaire et l'homéostasie de l'animal dépend de l'équilibre entre ces deux compartiments. Les électrolytes exercent chacun des rôles spécifiques dans l'organisme (régulation de la pression osmotique, perméabilité des cellules, conductivité électrique...). A ce titre, ils doivent être apportés en quantité suffisante dans l'alimentation afin de ne pas constituer un frein à l'expression du potentiel de production des animaux. Cependant, leur association est tout aussi importante à prendre en compte puisqu'elle peut altérer certaines fonctions physiologiques des animaux.

L'homéostasie acido-basique correspond au maintien des concentrations intra-cellulaire et extra-cellulaire en protons (H^+) à un niveau constant. Lorsque le pH interne n'est pas régulé cela pose de gros problèmes. En effet, H^+ n'existe pas sous forme libre mais sous formes hydratées (H_3O^+ ou $H_2O_2^+$). Celles-ci peuvent interagir avec d'autres molécules telles que les protéines, entraînant une modification de la structure quaternaire de ces dernières. Concrètement, cela peut entraîner une réduction de l'activité des enzymes, une modification des propriétés contractiles des muscles, une altération de l'oxygénation des tissus...

1.2. Systèmes de régulation

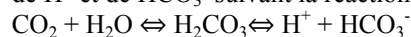
Plusieurs mécanismes permettent d'utiliser l'eau et les électrolytes apportés par l'alimentation tout en régulant l'équilibre hydrique et électrolytique de l'organisme. Des systèmes tampons ont une action immédiate pour limiter les écarts de pH : le système des phosphates, des protéines et des bicarbonates. D'après Bruggère (2009), ce dernier apparaît comme celui étant le plus facile à explorer et présente l'intérêt majeur de reposer sur un système ouvert par l'implication physiologique de la régulation pulmonaire sur la pression partielle de dioxyde de carbone (CO_2). La teneur en bicarbonate (HCO_3^-) peut varier entre 10 et 70 mM selon la valeur du pH plasmatique. L'ampleur de cette variation et la rapidité avec laquelle elle est modifiée (notamment par l'implication du système respiratoire) confèrent un rôle particulièrement important au système des bicarbonates dans la stabilisation du pH (Bruggère, 2009).

Les organes effecteurs intervenant dans l'équilibre acido-basique sont les poumons et les reins. Dans le système bicarbonates, la voie respiratoire permet d'évacuer une partie du CO_2 en excès tandis que la voie rénale assure la réabsorption/régénération de HCO_3^- . Les autres acides issus du métabolisme sont également évacués par les reins, avec par exemple l'excrétion de H^+ principalement sous forme d'ammonium (NH_4^+). Ainsi, chez le porc, le pH urinaire est normalement inférieur à 7. Il diminue quand l'alimentation conduit à une surcharge acide, mais l'excrétion urinaire de ce surplus est cependant contrainte par la valeur minimale que peut atteindre le pH urinaire (entre 4,0 et 4,5 d'après Patience (1990)).

Les poumons et les reins sont impliqués également dans d'autres fonctions de l'organisme, ce qui peut interférer avec l'équilibre acido-basique de l'animal. Ainsi par exemple en cas de stress thermique, les poumons contribuent également à la thermorégulation en évacuant de la chaleur sous forme de vapeur d'eau. Dans ce cas, la *polypnée* (ou hyperventilation) peut conduire à un état d'alcalose sous l'effet d'une diminution des réserves en CO₂. En ce qui concerne les reins, ils contribuent à l'élimination d'acides issus de nombreux processus dont le métabolisme des acides aminés et des phospholipides, mais en quantité très faible comparativement à l'acide carbonique.

1.3. Origine des acides

Les apports alimentaires sont riches en glucides et lipides, dont le métabolisme conduit à une surcharge acide que l'animal doit excréter. En effet, l'oxydation complète des glucides et des lipides conduit à la production de CO₂ et d'eau (H₂O). Bien que le CO₂ ne soit pas un acide, il se combine à une molécule d'H₂O pour former l'acide carbonique (H₂CO₃), ce qui mène potentiellement à une production importante de H⁺ et de HCO₃⁻ suivant la réaction :



Le pouvoir acidogène ou alcalogène de l'aliment peut s'apprécier à partir du calcul du bilan entre les cations (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) et les anions (Cl⁻, H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻, SO₄²⁻). Chez les ruminants, le bilan alimentaire cation/anion (BACA) prend en compte Na⁺, K⁺, Cl⁻ et S²⁻. Le bilan électrolytique (BE) proposé par Mongin (1981) est surtout utilisé chez les monogastriques :

BE (mEq/kg) = (Na/22,99+K/39,10-Cl/ 35,45) × 1000
où Na, K et Cl sont exprimés en g/kg.

En situation d'apport en acides aminés soufrés (méthionine et cystine) en excès, relativement à la lysine, leur oxydation partielle génère de l'acide sulfurique (H₂SO₄). Mais compte tenu du fait que cette situation d'excès n'est pas observée chez la volaille (Mack et al., 1999) et qu'elle conduit à une production de H₂SO₄ faible chez le porc, en pratique elle n'entraîne pas une remise en question du BE comme critère d'évaluation de l'aliment chez ces deux types de monogastriques.

1.4. Indicateurs du statut acido-basique

La valeur des indicateurs sanguins permettant d'évaluer l'équilibre acido-basique de l'organisme (Tableau 1) ne change que lorsque la totalité des bases ou des acides en excès ne parvient pas à être éliminée par la respiration ou par les reins. *A contrario*, ce n'est pas parce que les valeurs de ces paramètres semblent «normales», que les mécanismes de régulation de l'équilibre acido-basique ne sont pas activés. Ainsi, chez le porc, l'étude du pH urinaire permet de mettre

en évidence une éventuelle contribution de la régulation rénale, notamment en cas d'acidose. Cette mesure non invasive n'est cependant pas possible en volaille.

Tableau 1. Indicateurs caractéristiques de l'équilibre acido-basique dans le sang.

	Chez le porc ¹		Chez la volaille ²	
Sang	Artériel	Veineux	Artériel	Veineux
pH	7,48	7,41	7,49	7,39
H ⁺ , nM	33	39	33	41
pCO ₂ , mmHg	44	54	32	43
HCO ₃ ⁻ , mM	30	33	24	25

¹D'après Patience (1990).

²D'après Wideman et al. (2003).

2. LE BE CHEZ LE PORC

La plupart des études menées pour caractériser les effets du BE de l'aliment chez les porcs sont réalisées sur des pas de temps assez longs, i.e. pendant tout le post-sevrage qui dure 5 à 7 semaines, ou l'engraissement qui dure de 3 à 4 mois pour un porc abattu vers 115 kg de poids vif.

2.1. Utilisation digestive des aliments

L'effet du BE sur le coefficient d'utilisation digestive (CUD) dépend du nutriment considéré et du site de mesure. Si le CUD mesuré au niveau fécal ne varie pas significativement selon le BE pour la plupart des composants de l'aliment, il en va autrement du CUD mesuré au niveau iléal (CUDi). En effet, le CUDi de l'énergie augmente de 9 points quand le BE augmente de -50 à 400 mEq/kg (Haydon et West, 1990). La même étude indique que le CUDi de la plupart des acides aminés s'accroît de façon linéaire sur la même plage de valeurs de BE (soit +4,2 points pour la lysine), cependant l'amélioration de +3,8 points pour la méthionine n'est pas significative (Haydon et West, 1990). En parallèle, il apparaît que le coefficient de rétention de l'azote s'améliore de 2,2 points entre -50 et 250 mEq/kg et de 1,5 point supplémentaire entre 250 et 400 mEq/kg. Dans un contexte d'apports azotés réalisés au plus juste des besoins, ces résultats renforcent l'intérêt de faire en sorte d'éviter une baisse du BE dans les aliments à basse teneur en MAT, qui pourrait conduire à pénaliser la digestibilité des acides aminés et résulter dans des apports en-deçà du besoin.

2.2. Performances de croissance

Les études sont le plus souvent réalisées en condition d'alimentation à volonté et s'accordent sur l'absence d'effet du BE sur l'indice de consommation (IC). En revanche, elles divergent pour ce qui concerne l'effet

sur la vitesse de croissance (GMQ). Après avoir exprimé les résultats avec en base 100 le GMQ maximum intra-essai, des tendances se dégagent toutefois, qui diffèrent selon le stade de production.

Pendant le post-sevrage, les travaux conduits par Austic et al. (1983) et Patience et al. (1987) avec de nombreux traitements répartis sur une large gamme de BE (respectivement de -100 à 500 et de -75 à 350 mEq/kg), permettent d'obtenir le GMQ le plus élevé vers 215 mEq/kg, sans que la variation soit importante entre 100 et 275 mEq/kg (Figure 1a). Pendant l'engraissement, le GMQ varie peu lorsque le BE varie entre 175 et 300 mEq/kg (Figure 1b), ce qui rejoint les observations d'Apper-Brossard et al. (2009). De moins bonnes performances sont observées par Utley et al. (1987) et Haydon et West (1990) pour un BE en-deçà ou au-delà de cette plage de valeurs. Dans l'essai d'Utley et al. (1987), les perturbations de l'équilibre acido-basique peuvent avoir été accentuées par l'exposition à des températures élevées.

Tous les résultats présentés dans la figure 1ab étant obtenus en conditions d'alimentation à volonté, à l'exception de ceux obtenus par Patience et Chaplin (1987), les différences de vitesse de croissance sont à mettre en relation avec les effets sur l'appétit, dès lors qu'aucun effet significatif n'est observé sur l'IC.

2.3. Qualité de carcasse

L'IC est souvent considéré comme un indicateur de l'adiposité du gain de poids, mais dans le cas présent cela ne semble pas être le cas puisque, pour un même IC, Dourmad et Lebret (2000) rapportent une adiposité de carcasse plus élevée avec un BE de seulement 150 mEq/kg (vs. 210 et plus). Ces auteurs évoquent une possible modification du métabolisme

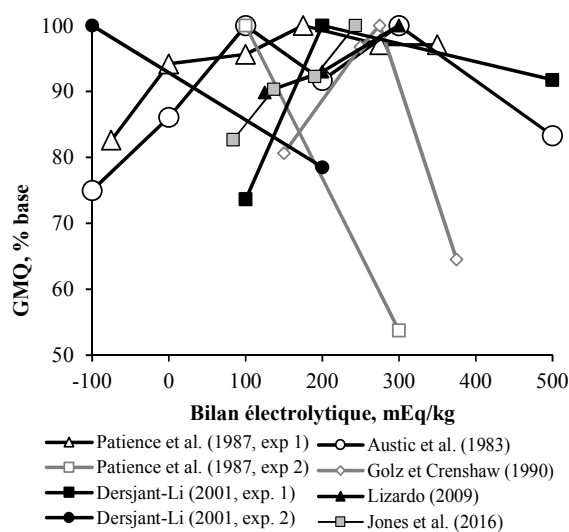
lipidique. Cette hypothèse n'a pas été vérifiée depuis lors, mais elle est cohérente avec les altérations qu'une baisse du pH sanguin peut entraîner sur l'activité des enzymes impliquées dans les voies métaboliques.

A l'arrivée à l'abattoir, certains porcs arrivent dans un état de fatigue avancée et présentent des signes d'acidose métabolique, conséquence des stress multiples ressentis (Ritter et Ellis, 2007). L'hypothèse qu'une adaptation de quelques jours à une surcharge acide d'origine alimentaire avant le transport pourrait contribuer à une meilleure homéostasie à ce stade a été avancée. Elle n'est cependant pas vérifiée par Edwards et al. (2010) qui n'observent plus de différences sur les paramètres sanguins après une mise à jeun de 10 h chez des porcs ayant reçu avant des aliments avec un BE de 121 ou 375 mEq/kg.

2.4. Santé

L'incidence du pouvoir acidogène de l'aliment sur la fréquence des ulcères gastriques chez le porc dépend du niveau de risque associé aux conditions de fabrication de l'aliment. Ainsi quand l'aliment est granulé à partir de matières premières broyées finement (355 µm en moyenne), Wondra et al. (1995) rapportent plus de problèmes d'ulcères quand le BE est de 134 (vs. 222 mEq/kg). Aucune différence significative n'est obtenue par ces auteurs sur une large plage de BE (de 177 à 399 mEq/kg) quand l'aliment est présenté sous forme de farine fabriquée avec une granulométrie plus grossière (488 µm en moyenne). La prévention des ulcères gastriques est parfois envisagée directement par l'ajout de bicarbonate de sodium dans l'eau de boisson (200 mOsm NaHCO₃ ; Cole et al., 2004) afin d'assurer que le pH gastrique ne diminue pas en dessous de 4 (Ange et al., 2000).

a – post-sevrage



b – engraissement

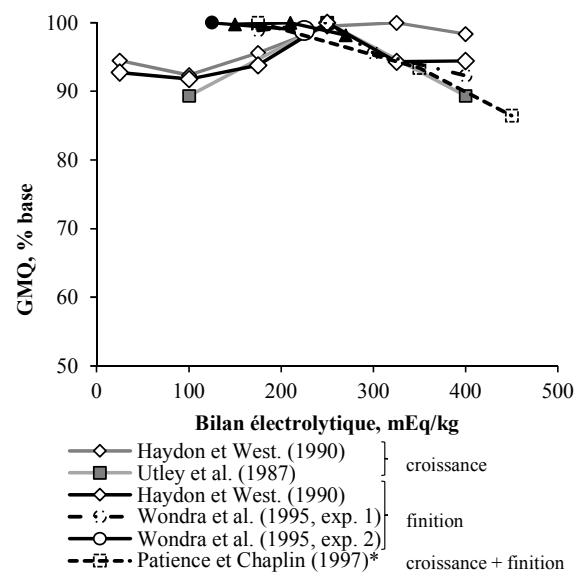


Figure 1. Evolution de la vitesse de croissance (GMQ) du porc selon le bilan électrolytique de l'aliment pendant le post-sevrage (a) ou l'engraissement (b) (revue de la littérature).

Base 100 : GMQ maximum atteint intra-essai ; * essai conduit avec des porcs alimentés de façon rationnée

D'après des résultats italiens et néerlandais rapportés par Dourmad et Meschy (1998), une augmentation de 50 mEq/kg du BE permettrait de réduire la fréquence d'apparition des problèmes d'aplombs. En effet, en cas d'acidose métabolique l'excès de protons est tamponné par les sels osseux, ce qui conduit à une déminéralisation du squelette. Ces problèmes résultent dans la plupart des cas d'une insuffisance rénale marquée ou de diarrhées chroniques (fuite de K^+), mais l'impact d'un BE faible n'est pas à négliger. Pour autant Ernst et al. (1990) n'obtiennent aucune différence entre des BE de 150 et 200 mEq/kg, de même que Dourmad et Lebret (2000) entre des BE de 150, 210 et 270 mEq/kg pendant tout l'engraissement. De même, Budde et Crenshaw (2003) ne rapportent aucune différence entre des BE de -35, 112 et 212 mEq/kg pendant 3 semaines de post-sevrage.

3. LE BE CHEZ LA TRUIE

3.1. En péri-mise bas

La taille de la portée a augmenté de plus de 25% depuis l'arrivée des lignées de truies dites hyperprolififiques dans les élevages de production (GTTT-IFIP, 2016). Parallèlement, la taille de portée au sevrage s'est accrue de 23% seulement, compte tenu des pertes plus nombreuses avant le sevrage (+43%). Dans ce contexte, toute solution permettant d'améliorer la survie des porcelets présente un intérêt majeur pour la filière. La diminution du BE de l'aliment distribué autour de la mise bas a été explorée dans cet objectif en suivant deux hypothèses. La première est plutôt d'ordre sanitaire ; elle considère qu'une surcharge d'acide qui provoquerait la diminution du pH urinaire permettrait de réduire la pression bactérienne et infectieuse au niveau de la truie, avec un effet potentiellement favorable sur ses performances et celles de sa portée. Ainsi, des valeurs de pH inférieures à 5,5 peuvent être atteintes avec un BE inférieur à 25 mEq/kg (Cheng et al., 2015 ; Darriett et al., 2017). Parallèlement, il semblerait que la teneur en immunoglobuline G soit accrue dans le colostrum, ce qui est potentiellement intéressant pour améliorer l'immunité passive du porcelet (Cheng et al., 2015).

La seconde hypothèse de travail est plutôt d'ordre physiologique, s'inspirant des mécanismes impliqués dans la fièvre vitulaire chez la vache laitière (Apper-Brossard et al., 2009). En provoquant une surcharge d'acide, l'idée est de favoriser la teneur en calcium sous sa forme active (ionisée) dans le plasma, compte tenu de son implication dans les contractions utérines (Ayliffe et al., 1983). Cette hypothèse n'est cependant pas vérifiée chez la truie par Cheng et al. (2015) ni par Darriett et al. (2017) qui n'observent pas de changement de la teneur circulante en Ca après distribution pendant 10 à 14 jours d'aliments avec des BE, respectivement, de 300 à -100 mEq/kg et de 139 à

27 mEq/kg. Cela peut s'expliquer par l'activation des autres mécanismes de régulation de la calcémie, l'excrétion de Ca par les reins étant ainsi accrue avec un BE bas. Cela peut expliquer que Cheng et al. (2015, 0 vs. 100 à 350 mEq/kg) et Boudon et al. (2016, 50 vs. 250 mEq/kg) n'observent pas d'amélioration de la survie des porcelets, voire même un ralentissement de la mise bas avec le BE le plus bas étudié. Toutefois, il est possible que cette réponse dépende des interactions entre minéraux ou systèmes puisqu'avec des aliments plus riches en phosphore (8 vs. moins de 6 g P total/kg dans les études ci-dessus), DeRouchey et al. (2003) observent une meilleure survie des porcelets avec un bilan électrolytique nul à négatif (0 à -100 mEq/kg).

3.2. Pendant la lactation

Après la mise bas, l'utilisation d'un aliment avec un BE suffisamment bas pour acidifier les urines peut être intéressante quand le contexte sanitaire n'est pas bon. Cela permet de limiter la croissance bactérienne et est considéré comme un des éléments de lutte contre le syndrome de cystite-pyélonéphrite (Martineau et Morvan, 2010). Toutefois, cette stratégie doit être envisagée avec prudence car elle provoque une augmentation des fuites urinaires de minéraux et est susceptible d'altérer la matrice osseuse de la truie sur le long terme. Par ailleurs, un BE bas influence négativement l'ingestion d'aliment, ce qui aggrave le déficit nutritionnel de la truie pendant cette période. Rechercher un BE plus élevé semble donc pertinent pendant la lactation, d'autant plus qu'il semble favoriser la production de lait dans les études de Dove et Haydon (1994, 277 vs. 176 mEq/kg) et de Lizardo (2009, 280 vs. 200 mEq/kg).

4. LE BE CHEZ LE POULET DE CHAIR

4.1. Performances de croissance

D'après les données de la littérature sur le poulet de chair, le pH sanguin évolue globalement de façon quadratique avec le BE. Un maximum de réponse est obtenu entre 260 et 320 mEq/kg (Figure 2).

Les variations de l'équilibre acido-basique peuvent être accompagnées d'une perte d'appétit et d'une baisse consécutive des performances de croissance. D'après les travaux de Szabo et al. (2011), la valeur de BE permettant d'optimiser le gain de poids dépend de l'âge des poulets. Durant les deux premières semaines de vie des animaux, un BE variant entre -50 et 325 mEq/kg n'influence pas le gain de poids. Ce dernier est maximisé pour un BE de 175 mEq/kg à 21 jours d'âge et entre 175 et 325 mEq/kg à 28, 35 et 42 jours d'âge.

Chez des animaux en croissance (0-21 jours), Rondon et al. (2001) proposent un BE compris entre 246 et 315 mEq/kg pour optimiser le gain de poids, la

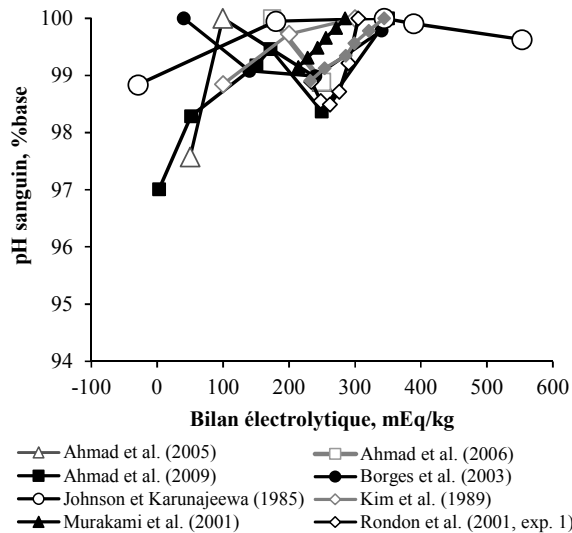


Figure 2. Evolution du pH sanguin en fonction du bilan électrolytique de l'aliment chez le poulet de chair (revue de la littérature).

consommation et l'IC. Une valeur de BE de 274 mEq/kg s'avère optimale dans les travaux de Koreleski et al. (2011). Les travaux de Ravindran et al. (2008) montrent un GMQ et un IC optimal entre 150 et 300 mEq/kg.

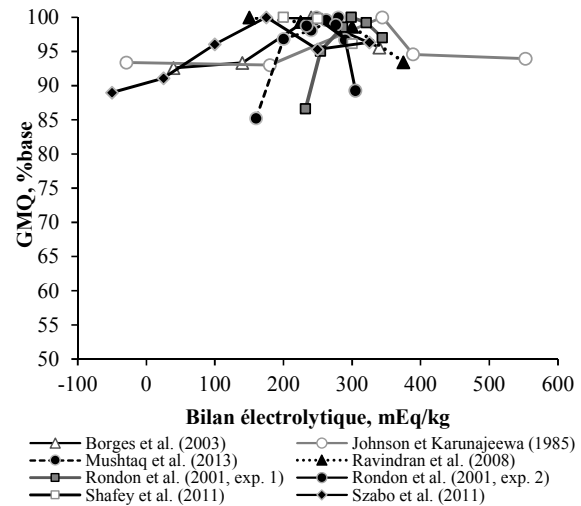
Pour des animaux plus âgés (> 21 jours), Borges et al. (2004) recommandent une valeur comprise entre 202 et 235 mEq/kg pour maximiser le gain de poids et l'IC et Murakami et al. (2000, 2001) des valeurs comprises entre 150 et 350 mEq/kg. Ces valeurs restent cohérentes avec celles obtenues par Johnson et Karunajeewa (1985 ; 180 et 300 mEq/kg).

Plutôt qu'une valeur fixe, c'est une plage de valeurs qui semble être pertinente au vue des résultats disponibles dans la littérature. En compilant ces données (Figure 3), une plage de BE entre 200 et 300 et entre 250 et 300 mEq/kg apparaît optimale, respectivement pour le GMQ et l'IC. Les effets négatifs d'un BE élevé sur les performances seraient en partie liés à une baisse de l'utilisation digestive de l'énergie et de la plupart des acides aminés (Ravindran et al., 2008). L'effet du BE sur la digestibilité des nutriments demande cependant à être vérifié.

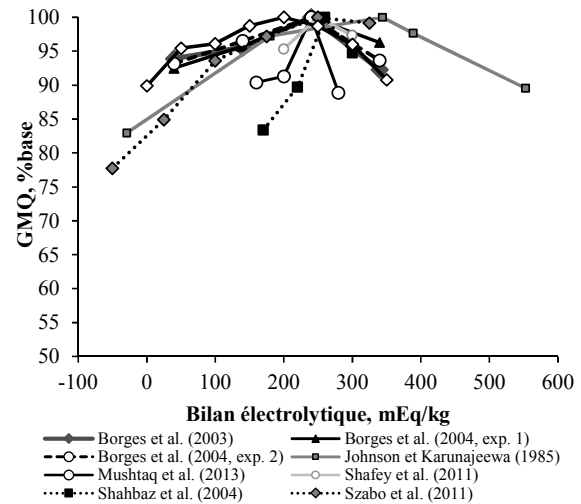
4.2. Qualité de carcasse

D'après les travaux de Vieites et al. (2005), le rendement de carcasse dépendrait du BE avec un optimum aux alentours de 200 mEq/kg dans le cas d'un apport de protéines de 20% sur l'ensemble de la phase d'élevage. Selon Mushtaq et Pasha (2013), le pourcentage de gras abdominal pourrait également être réduit quand le BE augmente. Ces observations pourraient s'expliquer par des altérations du fonctionnement métabolique liées à un changement de conformation des protéines consécutif à la baisse du pH sanguin.

a – vitesse de croissance, 0-21 j



b – vitesse de croissance, 22-42 j



c - indice de consommation, 22-42 j

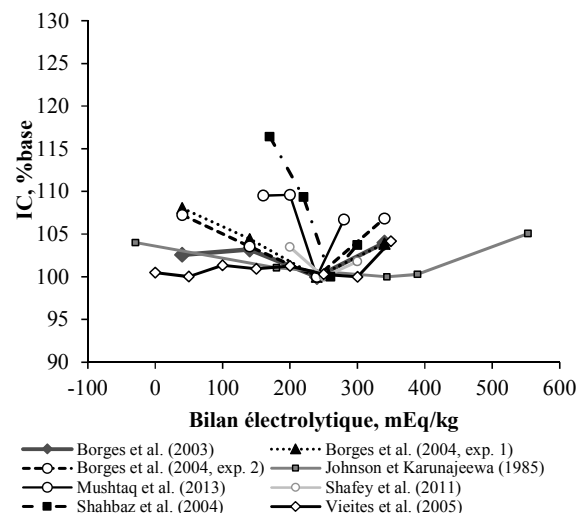


Figure 3. Evolution du gain moyen quotidien (GMQ) chez le poulet entre 0 et 21 (a) et 22 et 42 jours (b) d'âge et de l'indice de consommation (IC) (c) en fonction du bilan électrolytique de l'aliment (revue de la littérature).

4.3. Minéralisation osseuse

Le squelette représente un réservoir de substances alcalines mobilisables pour tamponner un excès d'acidité. Des niveaux élevés de Cl⁻ dans les aliments sont reconnus pour favoriser l'apparition de dyschondroplasie tibiale (Edwards, 1984). Dans les travaux de Murakami et al. (2003), une relation quadratique inverse entre le BE et des paramètres de dyschondroplasie tibiale a été mise en évidence. La zone hypertrophique et l'aire de l'épiphyse au niveau du cartilage tibial atteignent leur minimum pour un BE de 250 mEq/kg et augmentent, respectivement, de 9 à 50% et de 19 à 80% pour un BE de 200 et 320 mEq/kg sur la période de démarrage.

Pendant la phase de croissance, aucun effet notable du BE n'est rapporté. Szabo et al. (2011) ne montrent aucune modification significative de la teneur en cendres et macroéléments (Ca, P, Mg, Na et K) du fémur pour des valeurs de BE comprises entre -50 et 325 mEq/kg chez des poulets entre 1 et 42 jours d'âge. Ce résultat, ne confirme pas l'hypothèse de mobilisation osseuse induite par l'acidose. L'absorption du Ca alimentaire, à des niveaux relativement élevés dans cet essai, permettrait notamment de neutraliser la surcharge d'acide, éliminée ensuite au niveau rénal. La tendance actuelle à réduire la teneur en Ca des aliments pour optimiser l'utilisation digestive du phosphore pourrait donc être remise en perspective au regard du BE pour préserver l'intégrité du squelette.

4.4. Qualité de la litière

La consommation d'eau dépend directement de l'équilibre électrolytique du régime, qui affecte par conséquent l'humidité de la litière. Selon Borges et al. (2004), la consommation d'eau augmente linéairement avec le BE, soit +28% quand le BE augmente de 40 à 340 mEq/kg, ce qui conduit à une hausse de 18 points de l'humidité de la litière. De même, Rondon et al. (2001) observent une hausse de 40 à 56% de l'humidité de la litière pour un BE passant de 232 à 344 mEq/kg et Johnson et Karunajeewa (1985) une augmentation de 26 à 60% quand le BE passe de 180 à 553 mEq/kg. Sur une large gamme de BE (0 à 350 mEq/kg), Vieites et al. (2005) mettent en évidence que l'humidité de la litière répond de façon quadratique au BE avec un minimum atteint pour une valeur proche de 150 mEq/kg, valeur confirmée par la synthèse des données de la littérature (Figure 4).

5. LE BE CHEZ LA POULE PONDEUSE

5.1. Qualité de la coquille d'œuf

Le processus de calcification de la coquille d'œuf implique la sécrétion d'une grande quantité de Ca²⁺ et

d'HCO₃⁻ par la glande coquillière. Ce processus provoque le transfert de protons de la lumière de l'utérus dans la muqueuse et le sang. Cet afflux d'ions H⁺ au niveau sanguin a pour effet d'abaisser le pH et de provoquer une acidose (Mongin et Lacassagne, 1966). Cette dernière est partiellement corrigée par des adaptations des activités respiratoires et rénales qui représentent un coût supplémentaire pour l'animal. Certaines voies métaboliques impliquées dans la calcification sont reconnues pour être sensibles au pH (ex : hydroxylation de la 25-OH-vitamine D₃ et interaction PTH/Ca). Aussi, le maintien d'un BE alimentaire adéquat est nécessaire pour compenser l'acidose.

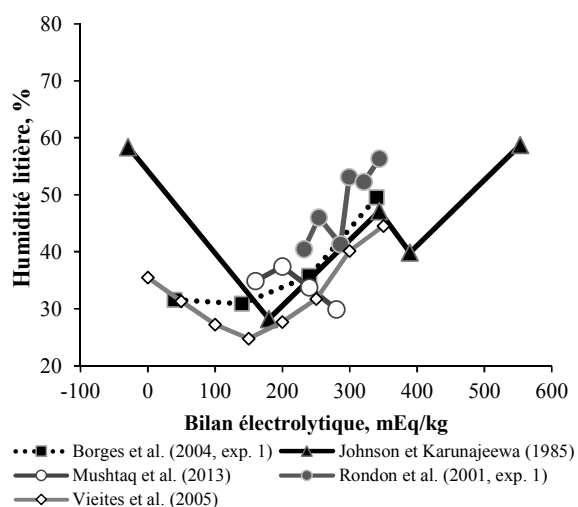


Figure 4. Evolution de l'humidité de la litière en fonction du bilan électrolytique de l'aliment chez le poulet de chair (revue de la littérature).

De nombreux travaux rapportent qu'un excès de Cl⁻ dans l'alimentation des poules pondeuses provoque une baisse du pH sanguin et dégrade la qualité de la coquille (Sauveur et Mongin, 1978 ; Austic, 1984 ; Junqueira et al., 1984 ; Chen et Balnave, 2001). Selon Yoselewitz et Balnave (1989), une baisse de l'activité de l'anhydrase carbonique au niveau de la glande coquillière expliquerait en partie cet effet négatif.

Une supplémentation en sels alcalinisants permet de compenser partiellement l'acidose métabolique et de maintenir la qualité de la coquille. Chez la poule en début de ponte (24 à 34 semaines d'âge), Nobakht et al. (2007) montrent qu'un BE de 360 mEq/kg atteint par une supplémentation en NaHCO₃ et KHCO₃ améliore l'épaisseur de la coquille et sa teneur en cendres comparativement à un BE de 240 mEq/kg. Chez la poule plus âgée (47-55 semaines d'âge), Gezen et al. (2005) préconisent un BE de 256 mEq/kg pour optimiser la solidité et l'épaisseur de la coquille (vs. 80 mEq/kg) et limiter la proportion d'œufs fêlés (vs. 80 et 330 mEq/kg).

L'allongement du cycle de production des poules pondeuses fait émerger de nouvelles problématiques. D'une part, la qualité de la coquille se dégrade avec

l'âge et le nombre d'œufs déclassés ou cassés augmente en fin de cycle de ponte, engendrant alors des pertes économiques. D'autre part, la fréquence des fractures tend à augmenter du fait d'une fragilisation du squelette posant la question du bien-être animal. L'os représente un réservoir de substances alcalines susceptibles d'être mobilisées en cas de déséquilibre acido-basique. Dans les travaux de Gezen et al. (2005), une détérioration de la teneur en cendres du tibia a été observée à la suite d'une baisse du BE de 256 à 170 mEq/kg. Dans ces conditions, la maîtrise du bilan électrolytique des aliments apparaît d'autant plus critique. Les adaptations physiologiques horaires de la poule en ponte nécessiteraient la mise en place de stratégies nutritionnelles de précision destinées notamment à contrebalancer la baisse de pH durant la période de calcification (10 à 24 h post-ovulation).

6. BE ET STRESS THERMIQUE

6.1. Chez la truie

La truie allaitante produit beaucoup de chaleur et est en situation de stress thermique permanent dès que la température ambiante dépasse 18-20°C, l'intensité de ce stress étant d'autant plus forte que la température augmente. Elle se répercute sur la prise alimentaire et la production de lait qui chutent de façon drastique au-dessus de 25°C (Quiniou et Noblet, 1999), contribuant ainsi à une moindre production de chaleur issue du métabolisme des nutriments.

La modification des caractéristiques nutritionnelles de l'aliment est l'une des solutions permettant d'atténuer les effets du chaud sur la truie allaitante, notamment *via* la diminution de la teneur en MAT (Renaudeau et al., 2001), ce qui conduit à un BE plus faible (voir chapitre 7). Or, l'équilibre acido-basique de la truie est déjà compromis par l'exposition au chaud, du fait de l'exportation importante de CO₂ par les voies respiratoires, suite à la mise en œuvre de la polypnée comme mécanisme de thermorégulation. Ainsi, en théorie, on peut concevoir que l'apport de HCO₃⁻ facilement disponible par la voie alimentaire soit d'autant plus important que l'aliment est formulé pour une basse MAT et qu'il est consommé au chaud.

Un essai conduit avec une baisse de la MAT (14,9 vs. 16,6%) et du BE associé (-51 mEq/kg seulement, 132 vs. 183 mEq/kg) n'a pas permis de démontrer un intérêt à corriger le BE dans ces conditions (Quiniou, 2004). Cela ne signifie pas pour autant que la truie ne soit pas exposée à un risque de déséquilibre acido-basique. En effet, le risque d'acidose métabolique provoqué par l'aliment à basse teneur en MAT peut se combiner avec le risque d'alcalose respiratoire induit par la polypnée et placer la truie en situation d'alcalose mixte.

6.2. En espèces avicoles

Face à un stress à la chaleur, des systèmes de compensation physiologiques sont mis en jeu chez les oiseaux, également mentionnés chez la truie : une baisse de consommation et une augmentation de la fréquence respiratoire. Cette dernière conduit à des pertes accrues de CO₂ à l'origine d'une alcalose respiratoire qui s'accompagne de modifications des niveaux plasmatiques en électrolytes. Une augmentation des pertes urinaires en électrolytes conduirait à une balance minérale négative pour Na⁺ et K⁺ (Belay et Teeter, 1993), suggérant des besoins supplémentaires en ces éléments.

Des baisses de performances de croissance chez le poulet de chair et une détérioration de la qualité de la coquille sont généralement observées au chaud.

Cependant, plusieurs études ont montré qu'une supplémentation en sels dans l'aliment ou dans l'eau de boisson permettait de contrecarrer les effets négatifs d'un stress lié au chaud (Borges et al., 2007). L'effet dépend du type de sels utilisés, notamment de la nature de l'anion accompagnant les cations (cf. chapitre 7). Une supplémentation en KCl à hauteur de 0,6% dans un régime de base (de 1 à 28 jours : BE de 186 mEq/kg ; de 29 à 42 jours : BE de 172 mEq/kg) améliore le gain de poids et l'efficacité alimentaire chez des poulets soumis à un stress à la chaleur (35 à 38°C ; Ahmad et al., 2008). Simultanément, une baisse significative du pH systémique est enregistrée (7,31 vs. 7,40). Notons qu'en parallèle la consommation d'eau augmente de près de 35% pénalisant la qualité de la litière.

Chez la poule pondeuse (32 à 42 semaines d'âge) soumise à des conditions d'ambiance tropicale, une supplémentation en NaHCO₃ (BE de 250 vs. 165 mEq/kg) dans un régime déconcentré en protéines permet de corriger les effets délétères de l'acidose métabolique induite par la ponte, avec une amélioration de la production d'œufs et de l'épaisseur de coquille (Ghasemi et al., 2014).

Chez la poule plus âgée (55 à 65 semaines d'âge) soumise à une gamme de BE de 0, 120, 240 ou 360 mEq/kg obtenue par incorporation de NaHCO₃ et KHCO₃, la densité et le poids de coquille sont améliorés pour un BE compris entre 240 et 360 mEq/kg (vs. 120 mEq/kg) et l'épaisseur de coquille pour un BE de 360 mEq/kg (vs. 0 mEq/kg) (Nobakht et al., 2006).

7. PRISE EN COMPTE DU BE EN FORMULATION

7.1. Caractéristiques des matières premières

Les sources de protéines telles que les tourteaux se caractérisent par une teneur élevée en K⁺ (Tableau 2). Or, leur taux d'incorporation diminue depuis une trentaine d'années et leur moindre utilisation conduit

donc à un BE plus faible. La baisse du BE est plus ou moins accentuée selon la forme de lysine de synthèse utilisée, l'apport sous forme de poudre étant associé à de l'acide chlorhydrique (HCl) contrairement à la forme liquide.

Tableau 2. Teneurs en électrolytes et bilan électrolytique (BE) de quelques matières premières dont des acides aminés industriels¹.

Matières premières	Na, g/kg	K, g/kg	Cl, g/kg	BE, mEq/kg
Blé	0,1	4,0	0,9	79
Maïs	0,04	3,2	0,5	68
Orge	0,1	4,8	1,1	98
Son de blé	0,1	12,3	0,9	295
Pois	0,1	9,8	0,8	229
Tourteau de soja 48	0,3	21,1	0,5	539
Tourteau de colza	0,4	12,3	0,7	313
Tourteau de tournesol	0,2	15,1	1,4	356
Graine de soja extrudée	0,8	18,5	0,4	500
Sel	393		606	0
Bicarbonate de sodium NaHCO ₃	270		40	10615
L-Lysine HCl (poudre)	3	0,2	192	-5331
L-Lysine liquide	0,3	0,8	0,5	19
L-Thréonine	0,5	0,5	2	-22
L-Tryptophane	2	2	2	82
L-Valine	0,1	2	0,5	41

¹Tables INRA-AFZ (2004) et Ajinomoto Eurolysine SAS (communication personnelle).

7.2. Nouvelles pratiques de formulation

Pour un même niveau d'apport en acides aminés essentiels, la diminution de la teneur en MAT touche principalement l'apport en acides aminés non essentiels. Or, ces derniers sont apportés surtout par les matières premières riches en protéines telles que les tourteaux ou sous forme d'acides aminés de synthèse. Au fil du temps, l'augmentation du nombre d'acides aminés industriels disponibles en formulation a permis d'aller plus loin dans la réduction de la teneur en MAT via une moindre utilisation des tourteaux. Les fluctuations du contexte de prix des matières premières y ont également contribué, la généralisation des formules à basse teneur en MAT ayant été impulsée fin 2007 par une envolée des cours du tourteau de soja (Note de Conjoncture IFIP). Enfin, la volonté affichée d'une plus grande autonomie protéique est également favorable à la moindre utilisation des ressources protéiques telles que celles issues du soja. Ainsi, l'incorporation de lysine, thréonine, méthionine, tryptophane et valine, plus rarement d'isoleucine, est désormais entrée dans les

habitudes de formulation. Des essais ont même été conduits qui démontrent la possibilité de s'affranchir partiellement ou totalement du tourteau de soja en période de finition chez le porc (Maupertuis et al., 2011; Quiniou et al., 2011) et chez le poulet de chair à croissance rapide (Méda et al., 2019), intermédiaire ou de type Label (Lessire et al., 2015 ; Méda et al., 2015).

7.3. Incorporation de sels dans la formule

Pour une même teneur en énergie (nette chez le porc, métabolisable chez la volaille) et en acides aminés essentiels de l'aliment, la baisse du taux d'incorporation du tourteau de soja permet d'abaisser la teneur en MAT mais le BE diminue parallèlement. L'ajout d'une contrainte de formulation pour un BE minimal restreint les possibilités de baisse de la MAT si la palette de matières premières n'est pas élargie pour permettre la stabilisation de ce critère, par exemple avec du bicarbonate de sodium (NaHCO₃).

Tableau 3. Contraintes minimales de formulation sur le bilan électrolytique (BE) et le taux de matières azotées totales (MAT) et caractéristiques des aliments pour porcs en croissance et finition selon l'utilisation ou non d'un correcteur d'acidité¹.

Stade	Croissance			Finition		
Contraintes minimales, /kg ²						
BE, mEq	175	175	175	175	175	175
MAT, g	165	-	-	150	-	-
Incorporation de NaHCO ₃	non	non	oui	non	non	oui
Incorporation, g/kg ³						
T. soja 48	196	187	90	150	125	93
NaHCO ₃	-	-	5,1	-	-	4,4
Lysine HCl	1,8	2,1	4,8	2,4	3,2	3,8
Méthionine	0,1	0,2	0,8	0,2	0,3	0,4
Thréonine	0,3	0,4	1,6	0,5	0,9	1,2
Tryptophane	-	-	0,4	0,1	0,2	0,2
Résultats, /kg						
MAT, g	165	162	134	150	140	138
€/tonne ⁴	218	218	209	211	211	202

1. Bicarbonate de sodium dans l'exemple.

2. Les autres contraintes de formulation de l'aliment sont identiques (énergie nette, acides aminés essentiels, phosphore, calcium...).

3. Les autres matières premières (céréales, minéraux, complexe vitamines et oligo-éléments) ne sont pas présentées.

4. Contexte de prix des matières premières : juin 2018 (Note de conjoncture IFIP).

L'exemple illustré dans le Tableau 3 indique que la teneur en MAT diminue seulement de 3 g/kg dans l'aliment porc croissance et de 6 g/kg dans l'aliment

porc finition si la contrainte minimale de BE (175 mEq/kg) doit être respectée seulement avec les matières premières habituellement utilisées pour formuler. En revanche, quand le BE peut être ajusté par incorporation de NaHCO_3 alors la baisse de MAT peut être 3 à 4 fois plus importante (respectivement, 14 et 20 g/kg à ces deux stades).

Chez le poulet de chair, les performances obtenues pour un même BE dépendent du type de sels incorporés dans l'aliment. Ainsi chez le poulet de 42 jours, une supplémentation sous forme de sels de potassium (K_2CO_3 et K_2SO_4) pour un BE de 250 mEq/kg conduit à des performances de croissance inférieures à celles obtenues avec différents sels (NaHCO_3 , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 et NH_4Cl) (Ahmad et al., 2005). Le KHCO_3 donne toutefois des réponses intermédiaires. Dans ce même essai, pour les sources de sodium, les meilleures performances sont enregistrées avec le bicarbonate comparé au carbonate ou au sulfate.

CONCLUSION

Le porc et les espèces avicoles sont exposés à un risque d'acidose métabolique, qu'intensifie aujourd'hui la formulation des aliments pour des teneurs abaissées

en protéines. Dans ce contexte, le BE doit être intégré dans les contraintes de formulation, en raison des conséquences qu'entraînent des aliments acidogènes sur les performances de croissance et de nombreux autres critères qui déterminent les résultats technico-économiques de l'élevage (santé, reproduction...). Notons que le niveau de chaque électrolyte doit parallèlement être maîtrisé pour répondre à leur besoin spécifique. Contrairement aux autres nutriments de la formule pour lesquels des plages de valeurs étroites sont utilisées en formulation, les recommandations de valeurs sont moins précises pour le BE. Celui-ci peut varier sur des plages relativement larges, mais qui dépendent néanmoins de l'espèce et du stade de production.

Les objectifs retenus pour le BE s'étendent pour la truie entre 220-320 mEq/kg pendant la gestation et entre 170 et 270 mEq/kg pendant la lactation, pour le porc entre 100 et 275 mEq/kg pendant le post-sevrage et entre 175 et 300 mEq/kg pendant l'engraissement, pour le poulet de chair entre 200 et 300 mEq/kg, et enfin pour la poule pondeuse entre 260 et 360 mEq/kg. Chez le poulet, bien que la plage de BE optimal soit identique entre les phases de croissance et de finition, l'amplitude de réponse en termes de GMQ est plus marquée chez les animaux plus âgés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmad T., Sarwar M., Nisa M.U., Haq A.U., Hasan Z.U., 2005. Anim. Feed Sci. Technol., 120, 277-298.
- Ahmad T., Mushtaq T., Mahr-Un-Nisa, Sarwar M., Hooge D.M., Mirza M.A., 2006. Br. Poult. Sci., 47(3), 249-256.
- Ahmad T., Khalid T., Mushtaq T., Mirza M.A., Nadeem A., Babar M.E., Ahmad G., 2008. Poult. Sci., 87, 1276-1280.
- Ahmad T., Mushtaq T., Khan M.A., Babar M.E., Yousaf M., Hasan Z.U., Kamran Z., 2009. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 93, 613-621.
- Ange K.D., Eisemann J.H., Argenzio R.A., Almond G.W., Blikslager A.T., 2000. J. Anim. Sci., 78, 2344-2352.
- Apper-Bossard E., Peyraud J.-L., Dourmad J.-Y., 2003. INRA Prod. Anim., 22 (2), 117-130.
- Austic R.E., 1984. Poult. Sci., 63, 1773-1777.
- Austic R.E., Boyd R.D., Klasing K.C., Riley W.W., 1983. J. Anim. Sci., 57(suppl. 1), 236.
- Ayliffe T.R., Noaked D.E., Silva J.R., 1983. Theriogenol., 21, 803-822.
- Belay T., Teeter R.G., 1993. Poult. Sci., 72, 116-124.
- Belloir P., Méda B., Lambert W., Corrent E., Juin H., Lessire M., Tesseraud S., 2017. Animal, 11(11), 1881-1889.
- Borges, S.A., Fischer da Silva A.V., Ariki J., Hooge D.M., Cummings K.R., 2003. Poult. Sci., 82, 428-435.
- Borges S.A., Fischer da Silva A.V., Moura A.S.A.M.T., Maiorka A., Ostrensky A., 2004. Int. J. Poult. Sci., 3(10), 623-628.
- Borges S.A., Fischer Da Silva A.V., Maiorka A., 2007. World's Poult. Sci. J., 63, 73-81.
- Boudon A., Quesnel H., Dourmad J.-Y., Duhamel J., Quémeneur B., Planchenault D., Narcy A., 2016. Journées Rech. Porcine, 48, 115-120.
- Bruggère H., 2009. Session AFTAA-AFZ, Équilibre électrolytique en alimentation animale, Paris, 01/10/2009.
- Chen J., Balnave D., 2001. Poultry Sci., 80, 91-94.
- Budde R.A., Crenshaw T.D., 2003. J. Anim. Sci., 81, 197-208.
- Cheng S.Y., Wang L., Chen X.L., Shi B.M., Shan A.S., 2015. Anim. Feed Sci. Tech., 200, 93-101.
- Cole J.T., Argenzio R.A., Eisemann J.H., 2004. J. anim. Sci., 82, 2757-2763.
- Darriet C., Axe D.E., Crenshaw T.D., 2017. J. Anim. Sci., 95, 212-225.
- Dersjant-Li Y., Verstegen M.W.A., Schulze H., Zandstra T., Boer H., Schrama J.W., Verreth J.A., 2001. J. Anim. Sci., 79, 1840-1848.

- DeRouchey J.M., Hancock J.D., Hines R.H., Cummings K.R., Lee D.J., Malonay C.A., Dean D.W., Park J.S., Cao H, 2003. *J. Anim. Sci.*, 81, 3067-3074.
- Dourmad J.-Y., Henry Y., Bourdon D., Quiniou N., Guillou D., 1993. Proc. 1st Intern. Conf. Nitrogen flow in pig production and environmental consequences, Ed. Verstegen W.A., den Hartog L.A., van Kempen G.J.M., Metz J.H.M., Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 206-211.
- Dourmad J.-Y., Meschy F., 1998. Le bicarbonate de sodium en nutrition porcine. Conférence GTV, SPACE, Rennes.
- Dourmad J.-Y., Lebreton B., 2000. *Journées Rech. Porcine*, 32, 163-168.
- Dove C.R., Haydon K.D., 1994. *J. Anim. Sci.*, 72, 1101-1106.
- Edwards H.M., 1984. *J. Nutr.*, 114, 1001-1013.
- Edwards L.N., Engle T.E., Paradis M.A., Correa J.A., Anderson D.B., 2010. *J. Anim. Sci.*, 88, 4068-4077.
- Ernst C.W., Rotschild M.F., Christian L.L., Ewan R.C., 1990. *J. Anim. Sci.*, 68, 2583-2590.
- Gezen S.S., Eren M., Deniz G., 2005. *Revue Méd.Vét.*, 156(10), 491-497.
- Ghasemi R., Torki M., Ghasemi H.A., 2014. *Trop. Anim. Health Prod.*, 46, 717-723.
- Golz D.I., Crenshaw T.D., 1990. *J. Anim. Sci.*, 68, 2736-2747.
- GTTT-IFIP, 2016. Porcs par les chiffres, Ed. IFIP, Paris, 44 pp.
- Haydon K.D., West J.W., 1990. *J. Anim. Sci.*, 68, 3687-3693.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons (D. Sauvant, J.M. Pérez, G. Tran, edit.), INRA Editions, Versailles, 304 pp.
- Johnson R.J., Karunajeewa H., 1985. *J. Nutr.*, 115, 1680-1690.
- Jones A., Woodworth J.C., Dritz S.S., Tokack M.D., 2016. *Kansas Agric. Exp. Station Res. Rep.*, 2(8), 28, 11 pp.
- Junqueira O.M., Costa P.T., Miles R.D., Harms R.H., 1984. *Poult. Sci.*, 63, 123-130.
- Lessire, M., Méda, B., Dusart, L., Hallouis, J.-M., Bordeau, T., Souchet, C., Mercierand, F., Hatte, C., Bouvarel, I., Berri, C., 2015. *Journées Rech. Avic.-Palm. Foie Gras*, 11, 893-898.
- Lizardo R., 2009. Résultats d'essai en Espagne sur le BE en élevage porcin. Journée Technique Solvay, Rennes.
- Mack S., Bercovivi D., De Groote G., Leclercq B., Lippens M., Pack M., Schutte J.B., Van Cauwenberghe S. 1999. *Br. Poult. Sci.*, 40, 257-265.
- Martineau G.-P., Morvan H., 2010. *Maladies d'élevage des porcs*, 2ème édition. France Agricole, 601 pp.
- Maupertuis F., 2011. Rapport, Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire, 4 pp.
- Méda B., Dusart L., Lessire M., Hallouis J.-M., Bordeau T., Souchet C., Mercierand F., Hatte C., Bouvarel I., Berri C., 2015. *Journées Rech. Avic.-Palm. Foie Gras*, 11, 1082-1087.
- Méda B., Tesseraud S., Lambert W., Tormo E., Juin H., Lessire M., 2019. *Journées Rech. Avic.-Palm. Foie Gras*, 13, sous presse.
- Mongin P., Lacassagne L., 1966. *Annls. Biol. Anim. Biochim. Biophys.*, 6, 93-100.
- Mongin, P., 1981. *Proc. Nutr. Soc.*, 40, 285-294.
- Murakami A.E., Saleh E.A., Watkins S.E., Waldroup P.W., 2000. *J. Appl. Poultry Res.*, 9, 53-61.
- Murakami A.E., Oviedo-Rondon E.O., Martins E.N., Pereira M.S., Scapinello C., 2001. *Poult. Sci.*, 80, 289-294.
- Murakami A.E., Franco J.R.G., Martins E.N., Oviedo-Rondon E.O., Sakamoto M.I., Pereira M.S., 2003. *J. Appl. Poult. Res.*, 12, 207-216.
- Mushtaq M.M.H., Pasha T.N., 2013. *World's Poult. Sci. J.*, 69, 833-851.
- Mushtaq M.M.H., Pasha T.N., Akram M., Mushtaq T., Parvin R., Choi H.C., Hwangbo J., Kim J.H., 2013. *Asian Australas. J. Anim. Sci.*, 26(6), 845-855.
- Nobakht A., Shivazad M., Chamany M., Safameher A.R., 2006. *Int. J. Poult. Sci.*, 5(10), 955-958.
- Nobakht A., Shivazad M., Chamany M., Safameher A.R., 2007. *Pakistan J. Nutr.*, 6(6), 543-546.
- Patience J.F., Austic R.E., Boyd R.D., 1987. *J. Anim. Sci.*, 64, 457-466.
- Patience J.F., 1990. *J. Anim. Sci.*, 68, 398-408.
- Patience J.F., Chaplin R.K., 1997. *J. Anim. Sci.*, 75, 2445-2452.
- Quiniou N., Noblet J., 1999. *J. Anim. Sci.*, 77, 2124-2134.
- Quiniou N., 2004. *Journées Rech. Porcine*, 36, 235-242.
- Quiniou N., Primot Y., Peyronnet C., Quinsac A., 2011. *Journées Rech. Porcine*, 43, 135-136.
- Ravindran V., Cowieson A.J., Selle P.H., 2008. *Poult. Sci.*, 87, 677-688.
- Renaudeau D., Quiniou N., Noblet J., 2001. *J. Anim. Sci.*, 79, 1240-1249.
- Ritter M., Ellis M., 2007. Proc. Animal Care and Handling Conference, Overland Park, Kansas, USA.
- Rondon E.O., Murakami A.E., Furlan A.C., Moreira I., Macari M., 2001. *Poult.Sci.*, 80, 592-598.
- Sauveur B., Mongin P., 1978. *Br. Poult. Sci.*, 19, 475-485.
- Schafey T.M., Aljumaah R.S., Abdelhalim M.A.K., Mady M.M., Ghannam M.M., 2011. *J. Anim. Vet. Adv.*, 10(22), 2902-2908.
- Shahbaz T.H., Zafar Alam M., Nadeem A., Ashfaq M., 2004. *Pak.J. Life Sco. Sci.*, 2(1), 82-84.
- Squires E.J., Julian R.J., 2001. *Br. Poult. Sci.*, 42, 207-212.

- Szabo J., Vucskits A.V., Andrasofszky E., Berta E., Bersenyi A., Borzsonyi L., Palfi V., Hullar I., 2011. Acta Vet. Hung., 59(3), 295-310.
- Utley R.D., Haydon K.D., West J.W., 1987. J. Anim. Sci., 65(suppl. 1), 303.
- Vieites F.M., de Moraes G.H.K., Teixeira Albino L.F., Santiago Rostagno H., Atencio A., de Vargas junior J.G., 2005. R. Bras.Zootec., 34(6), 1990-1999.
- Wideman, Jr. R.F., Hooge D.M., Cummings K.R., 2003. Poult. Sci., 82, 560-570.
- Wondra K.J., Hancock J.D., Behnke K.C., Hines R.H., 1995. J. Anim. Sci., 73, 414-420.
- Yoselewitz I., Balnave D., 1989. Austr. J. Agr. Res., 40, 1111-1115.