

La prédiction de la valeur énergétique des matières premières destinées à l'aviculture

L'utilisation de la teneur en parois végétales insolubles dans l'eau (PAR) en tant que variable prédictrice de la valeur énergétique des aliments avicoles est un nouveau concept au même titre que le fut l'introduction du dosage de l'amidon en nutrition aviaire : ces deux changements, qui interviennent à environ un demi-siècle de distance, répondent au même besoin d'adaptation des mesures chimiques aux phénomènes digestifs observés chez les espèces aviaires.

Le niveau des valeurs énergétiques des aliments destinés à l'aviculture est à l'origine d'une grande part de leur coût. A ce titre, ces valeurs exigent d'être connues avec un maximum de justesse et de précision. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la valeur énergétique d'un aliment : 1/ l'évaluation *in vivo* ; 2/ l'utilisation des tables d'évaluation des matières premières ; 3/ l'utilisation des formules prédictrices de la valeur énergétique destinées soit aux aliments complets, soit aux matières premières. La première méthode est probablement la plus juste, mais irréalisable à l'échelle industrielle compte-tenu du nombre d'échantillons à traiter. Dans la pratique industrielle, les évaluations *in vivo* ne peuvent être appliquées qu'en sondage. L'utilisation des tables d'évaluation des matières premières, souvent mise en pratique, peut donner satisfaction. Cependant, la seule utilisation des tables ne permet pas de résoudre le problème de la variabilité de la qualité des matières premières. L'application des équations de prédiction des valeurs énergétiques peut pallier ce dernier

problème. Nous nous proposons de présenter ici les travaux passés et récents relatifs à la prédiction de la valeur énergétique des matières premières destinées à l'aviculture. Les prédictions se rapportant aux aliments complets sont présentées par ailleurs dans un autre article (Carré 1990).

Le système énergétique le plus couramment utilisé **en aviculture** est celui de l'énergie métabolisable (EM). En Europe, la tendance actuelle est d'exprimer l'EM en énergie métabolisable apparente (EMA) corrigée pour un bilan azoté nul (EMAn ; Bourdillon *et al* 1990). La correction pour un bilan azoté nul supprime les variations dues à des niveaux de synthèses protéiques différents. Elle permet donc d'identifier plus clairement les sources de variation des valeurs énergétiques : après correction, il n'y a guère que les teneurs et les digestibilités des constituants de l'aliment qui puissent faire varier les valeurs énergétiques. Chez le coq adulte, les bilans azotés sont le plus souvent proches de zéro : pour ces animaux, les valeurs d'EMA et d'EMAn sont donc le plus souvent très voisines.

Résumé

Cet article présente les équations établies par l'INRA pour la prédiction des valeurs énergétiques de 10 groupes de matières premières destinées à l'aviculture. Il relate aussi les difficultés généralement rencontrées lors de l'établissement de telles équations. Ces difficultés expliquent l'évolution des techniques utilisées pour établir les équations de prédiction. Cette évolution se traduit par la mise au point d'équations de plus en plus rationnelles et de moins en moins spécialisées. L'utilisation de la teneur en parois végétales insolubles dans l'eau (PAR) a été déterminante dans le développement de cette évolution.

1 / Problèmes spécifiques des équations destinées aux matières premières

Avant de présenter les équations, il n'est pas inutile de rappeler les difficultés propres à la prédiction de la valeur énergétique des matières premières. Ces difficultés sont en effet

La faible marge de variation des critères analytiques souvent rencontrée à l'intérieur des groupes d'échantillons expérimentaux étudiés représente une difficulté majeure pour l'établissement des équations de prédiction.

beaucoup plus nombreuses que dans le cas des aliments complets (Carré 1990). Elles sont à l'origine des techniques utilisées pour les prédictions. Certaines équations possèdent une logique sous-jacente qu'il est utile de connaître pour deux raisons : cette connaissance permet, d'une part de choisir l'équation adéquate à chaque problème, d'autre part d'utiliser tout le potentiel des équations. En effet, l'introduction d'une rationalité biologique dans l'établissement des équations permet d'en faire de plus en plus des outils modulables et non plus des outils spécialisés qui ne seraient applicables que dans des domaines très restreints.

Les difficultés rencontrées lors de l'établissement des prédictions appliquées aux matières premières sont dues : 1/ aux variations éventuelles de leurs EM en fonction de leur taux d'incorporation dans les régimes ; 2/ aux variabilités de leurs EM induites, dans certains cas, par les variabilités des digestibilités de leurs constituants ; 3/ à la faible marge de variation des critères analytiques, souvent rencontrée parmi les échantillons expérimentaux d'un même type.

1.1 / Effet du taux d'incorporation des matières premières dans les régimes

Une prédiction correcte suppose de disposer de valeurs énergétiques mesurées *in vivo* d'une manière correcte. La détermination *in vivo* peut s'avérer difficile si la matière première est peu appétante ou si sa valeur énergétique varie en fonction du taux d'incorporation, ces deux défauts étant d'ailleurs souvent liés. L'additi-

vit des valeurs énergétiques devrait être systématiquement vérifiée. En effet, par exemple, des réponses non-linéaires ont été observées avec les farines de viande (Lessire *et al* 1985) et les graisses (Shannon 1971, Mateos et Sell 1980, Wiseman et Lessire 1987a, de Groot *et al* 1987). Des équations ont donc été proposées, reliant la valeur énergétique et le taux d'incorporation pour les farines de viande (Lessire *et al* 1985) et les matières grasses (Wiseman et Lessire 1987b). Ces dernières sont probablement les produits dont il est le plus difficile de prédire la valeur énergétique. En effet, de nombreux facteurs peuvent faire varier leur valeur énergétique : âge des animaux, composition en acides gras, acidité, degré d'oxydation, taux d'incorporation, etc. Huyghebaert *et al* (1988) et Janssen (1985) ont ainsi proposé des équations basées sur des paramètres chimiques (composition en acides gras, pourcentage de lipides non polaires, indice d'iode) pour un taux d'incorporation de 10 %.

Pour les farines de viande utilisées à des niveaux d'incorporation de 10 à 20 %, Lessire et Leclercq (1983) ont proposé une équation utilisant les cendres et les matières grasses. Farrell (1980) a obtenu une équation basée sur les deux mêmes paramètres ; cependant, les valeurs énergétiques prédites sont très inférieures à celles de l'équation de Lessire et Leclercq (1983) du fait, sans doute, des niveaux élevés d'incorporation (50 %) de la matière première. Ces deux études ont été faites sur coqs adultes.

Pour de nombreuses matières premières contenant des facteurs antinutritionnels tels

Tableau 1. Equations de prédiction de l'énergie métabolisable apparente (EMA) des matières premières en farine, chez le coq adulte. Toutes les données sont exprimées par rapport à la matière sèche en kcal/kg et %.

Matières premières	Domaine d'application (% MS)	Niveau d'introduction dans le régime expérimental (%)	EMA (kcal/kg MS)	Ecart-type résiduel (kcal/kg MS)	r ²	nombre d'échantillons testés
Orge (1)	4,1 < CB < 6,2	90	3780 - 114 × CB	50	0,41	25
Sorgho (1)	0,27 < Tan < 1,61	94	3871 - 397 × Tan	62	0,91	13
Tourteaux de colza (0) (1)	1,3 < Lip _A < 5,7 37,1 < PB < 41,0	30	- 4828 + 1,73 × EB + 36,6 × Lip _A - 216 × Ce	134	0,60	18
Tourteaux (1) de tournesol	34,9 < PB < 41,5 0,6 < Lip _A < 2,8	30	603 + 27 × PB + 30,4 × Lip _A	55	0,60	12
Farines de viandes (2)	2,1 < Lip _A < 3,0 19,0 < Ce < 36,5	15	3573 + 59,8 × Lip _A - 45,6 × Ce	141	0,88	10
Matières grasses (3,4)	7000 < EMAn < 9000	7	3983 + 66,18 × I	385	0,82	7
Corn-gluten feeds et Sous-produits du blé tendre	2,7 < Ce < 9,6 21,5 < PAR < 49,3	40 40	3887 - 52 × Ce - 37,5 × PAR 31,3 × PB + 66,3 × Lip _A + 39,1 × ENA _{PAR}	56 57	0,97 0,96	6 + 6 6 + 6

(1) D'après Lessire et Conan ; (2) Lessire *et al* 1985 ; (3) Lessire 1985 ; (4) Chez les poussins de 18 jours ; CB : cellulose brute ; Tan : tannins selon Daiber (1975) avec l'acide tannique comme étalon ; Lip_A : lipides extraits à l'éther de pétrole sans traitement acide ; EB : énergie brute ; Ce : cendres ; PB : protéines brutes (N × 6,25) ; PAR : parois végétales insolubles dans l'eau (Carré et Brillouet 1989) ; I : indice d'iode ; ENA_{PAR} (%) = 100 - PB - Lip_A - Ce - PAR.

que les glucosinolates (colza de type « simple zéro »), l'acide médicagénique (luzerne) ou les arabino-xylanes solubles (seigle), on peut s'attendre à observer des effets non linéaires. Il en est ainsi du seigle chez le poussin (Mc Auliffe et Mc Ginnis 1971). Il est donc conseillé de s'en tenir, pour la mesure *in vivo* de l'EM de ces matières premières, à des taux d'incorporation proches de ceux utilisés couramment. Pour les faibles taux d'incorporation, il est nécessaire d'augmenter le nombre des mesures *in vivo* afin de maintenir une précision correcte, puisque la précision diminue en même temps que le taux d'incorporation. Compte-tenu des difficultés des mesures *in vivo*, on risque donc d'aboutir à des équations dont la précision est un peu décevante, comme celle relative aux tourteaux de colza (Lessire et Conan, communication personnelle) rapportée dans le tableau 1.

1.2 / Variabilité de la digestibilité des constituants des matières premières

Si la faible précision de l'équation relative aux tourteaux de colza est sans doute liée en partie à la variabilité des mesures *in vivo*, il est probable qu'elle est également due à la variation de la digestibilité des protéines d'un échantillon à l'autre. La même explication peut être proposée pour les corrélations médiocres observées avec le pois entre paramètres analytiques et valeurs énergétiques (Lessire *et al* 1980). En effet, les digestibilités de l'amidon et des protéines de pois cru sont très variables d'un échantillon à l'autre (Conan et Carré 1989). Pour les légumineuses, il serait beaucoup plus efficace d'établir les équations à partir d'échantillons granulés, car les traitements technologiques tendent à réduire fortement cette variabilité en ramenant les digestibilités vers des valeurs plafonds. Pour prédire la variabilité de la digestibilité des acides aminés, des méthodes ont été envisagées, mais leurs recommandations demeurent limitées (Papadopoulos 1985).

1.3 / Variation étroite des compositions des échantillons expérimentaux

La troisième raison pour laquelle il est difficile d'établir des équations pour les matières premières tient aux limites étroites des variations des prédicteurs analytiques à l'intérieur des échantillons étudiés. Il en résulte souvent un faible coefficient de corrélation, des équations d'allure empirique et des domaines d'application limités. De plus, les paramètres analytiques sont très souvent corrélés. Leur nombre doit donc être limité pour éviter la redondance, ce qui empêche de prendre en compte l'ensemble des facteurs de variation.

2 / Propositions de quelques solutions

Parmi les trois sources de difficultés que nous venons de présenter, c'est probablement la dernière qui est la plus classiquement rencontrée et qui est bien souvent le principal fac-



teur limitant. Les « quelques solutions » présentées ici ne concerneront que ce dernier problème relatif à la faible variabilité des compositions à l'intérieur des échantillons étudiés.

2.1 / Les équations basées sur la digestibilité des constituants alimentaires

La prise en compte de la digestibilité des constituants de l'aliment est probablement une voie efficace pour résoudre le problème que nous venons d'évoquer (Titus 1955, Janssen 1976, Hartel 1979). Elle conduit à des équations moins sensibles aux limites de variation des paramètres. Un exemple de cette approche est la Table européenne des matières premières pour volailles (1986). Dans cet esprit, Hartel (1979) a recommandé d'utiliser la digestibilité de l'amidon et des sucres plutôt que celle de l'extractif non azoté.

L'inconvénient de la démarche basée sur les digestibilités est de devoir mesurer *in vivo* l'utilisation digestive de 6 paramètres (les lipides, les protéines, l'amidon, les sucres, les fibres et l'énergie) pour établir les équations linéaires. Les équations basées sur la digestibilité des nutriments sont donc efficaces, mais leur établissement expérimental prend beaucoup de temps.

2.2 / Les équations basées sur plusieurs groupes de matières premières

Une alternative peut consister à appliquer le calcul des droites de régression à un ensemble de types de matières premières de façon à disposer d'un large domaine de variation des paramètres analytiques, et d'un plus grand nombre de données. Cependant, cette approche a été peu utilisée. Il est, en effet, difficile d'obtenir

une approche efficace avec les paramètres utilisés habituellement. Par exemple, le système [Protéines brutes, extrait étheré, amidon, sucres] ne tient pas compte des polysaccharides solubles non amylacés (PSNA) et des acides organiques. Or, les polysaccharides solubles non amylacés sont probablement digérés chez le coq (Carré *et al* 1990) et devraient donc être pris en compte avec les autres composants digestibles, surtout quand leur teneur varie notablement, comme cela a été observé parmi les céréales et leurs sous-produits (Nyman *et al* 1984); ces auteurs ont, en effet, observé que cette fraction représentait respectivement 0 %, 0,5 %, 0,5 %, 1,4 %, 3,8 % et 3,9 % de la matière sèche des grains entiers de maïs, sorgho, riz, blé, seigle et orge. Saini et Henry (1989) ont abouti à des valeurs similaires: 1,8 % et 3,6 % d'arabinoxylanes solubles dans le blé et le seigle.

Les acides organiques sont aussi des constituants présents en quantité appréciable dans certaines matières premières. Par exemple, le procédé humide de production des corn-gluten-feeds peut conduire à la présence d'acides organiques en quantité non négligeable. D'après Bolton et Dewar (1962 et 1965), ces acides organiques sont métabolisables. Ils doivent donc être pris en compte pour évaluer l'énergie métabolisable des matières premières qui en renferment.

L'extractif non azoté, la cellulose brute et la fibre au détergent neutre (NDF) pourraient esti-

mer directement ou indirectement ces constituants (PSNA et acides organiques). Malheureusement, pour les oiseaux, ces critères analytiques ne recouvrent pas de concept nutritionnel très précis. En effet, la digestibilité de l'extractif non azoté dépend des proportions respectives de l'amidon et des hémicelluloses. Quant à la cellulose brute et au NDF, ils ne représentent qu'une partie variable des parois insolubles non digestibles (Carré et Leclercq 1985, Carré et Brillouet 1986, Carré *et al* 1990).

Le paramètre PAR (parois végétales insolubles dans l'eau; tableau 2) peut indirectement tenir compte de cette fraction (acides organiques et polysaccharides non amylacés solubles) sans introduire le biais d'une signification nutritionnelle imprécise. En effet, le paramètre PAR rend compte de la totalité des constituants pariétaux indigestibles chez les oiseaux (Carré 1990). On peut alors être tenté de l'utiliser dans des équations réunissant plusieurs groupes de matières premières (Carré *et al* 1988).

L'exemple des produits céréaliers. Un exemple, présenté dans le tableau 1, illustre cette démarche.

On a calculé deux équations de régression multiple utilisant le paramètre PAR, à partir de l'ensemble de 6 corn-gluten-feeds et 6 sons de blé. Les corrélations entre prédicteurs sont faibles ($R^2 < 0,21$) et non significatives. L'EMA est prédite avec une précision très correcte ($R^2 = 0,96$; écart-type résiduel = 57 kcal/kg de

Tableau 2. Teneurs en parois végétales insolubles dans l'eau (1). Tous les pourcentages sont exprimés en fonction du produit brut.

Matières premières	Numéros de code (2)	Parois insolubles dans l'eau (% produit brut)	Matières premières	Numéros de code (2)	Parois insolubles dans l'eau (% produit brut)	
Avoine	1	25,0	Luzernes déshydratées	cellulose brute : 21,2 % 25,0 % 27,0 % 30,4 %	114 115 116 117	40,3 45,9 48,6 54,0
Blé	2	10,5				
Maïs	3	8,9				
Orge 2 rangs	4	14,5				
Orge 6 rangs	5	16,5				
Sorghos { pauvre en tanins riche en tanins	6	9,0	Coques de soja	119	61,0	
	7	11,0	Féverole	122	16,0	
Sous-produits du blé tendre { remoulage blanc remoulage bis son fin son gros	23	19,0	Lupin blanc doux	125	27,0	
	24	31,5	Lupin bleu angustifolius		37,0	
	25	41,0	Pois lisse d'hiver	126	13,0	
	26	45,7	Pois lisse de printemps	127	11,5	
Corn distiller (amidon 10 %, cell. br. 7,8 %)		31,0	Graine de pois chiche Kulabi		10,0	
Gluten feed de maïs	29	33,0	Graine de Canavalia ensiformis		17,5	
Pulpes ordinaires de betterave	70	46,0	Soja, graine entière non traitée (Lip. 18 %, cell. brute 6 %)		16,5	
Manioc racines	77	5,8	Tourteaux de colza { dépelliculé de pression solvant	131	18,7	
Manioc (amidon 72 %, cell. brute 1,9 %)		4,4			132	27,4
				Tourteaux de soja { 44 48 50	133	29,8
			137		21,3	
				138	18,0	
	139	15,2				
			Tourteaux de tournesol (Prot. 31,8 %, cell. brute 24,4 %, Lip. 1,4 %)		39,7	

(1) La méthode est celle décrite par Carré et Brillouet (1989).

(2) Numéros de code du livre « L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles » (INRA, 1989). Les teneurs en eau sont les mêmes que celles mentionnées dans ce livre.

Tableau 3. Equations de prédiction de l'énergie métabolisable apparente (coq adulte, aliment non granulé) des tourteaux de soja (S), tournesol non décortiqué (T), colza (O) non décortiqué (C), et des farines de luzernes (L)*. Les chiffres sont à exprimer en kcal/kg MS et % MS.

(1) EMA = a_s × PB + 75,56 × Lip_A + 26,10 × ENA_{PAR}		
Avec les valeurs de a _s suivantes :		
a _s = 38,19		R ² = 0,970
a _T = 33,50		ETR = 104 kcal/kg MS
a _C = 28,12		dl Rés. = 21
a _L = 22,73		
(2) EMA = 0,364 × EB^{1,1} - b_i × PAR - c_i × PB		
Avec les valeurs de b _i et c _i suivantes :		
b _S = 34,9	c _S = 11,63	R ² = 0,975
b _T = 39,1	c _T = 16,35	ETR = 95 kcal/kg MS
b _C = 38,0	c _C = 22,65	dl Rés. = 21
b _L = 38,4	c _L = 33,37	
(3) EMA = d_i (4217 + 78,8 × Lip_A - 58,3 × Ce - 39,7 × PAR)		
Avec les valeurs de d _i suivantes :		
d _S = 0,831		R ² = 0,969
d _T = 0,750		ETR = 107 kcal/kg MS
d _C = 0,664		dl Rés. = 20
d _L = 0,605		

* Niveaux d'incorporation des matières premières lors des mesures d'EMA : soja et tournesol, 40 % ; colza et luzerne, 25 %.
 Domaine d'application pour les tourteaux de soja, tournesol non décortiqué, colza (O) non décortiqué, et les farines de luzerne :
 Lipides_A < 6 % MS ; 15,4 % MS ; N × 6,25 < 55,0 % MS ; 16,5 % MS < PAR < 56 % MS ; 6,8 % MS < cendres < 14,6 % MS. Nom-
 bres d'échantillons par groupe : 7 (soja) ; 9 (tournesol) ; 6 (colza) ; 7 (luzerne).

matière sèche). Aucun biais n'apparaît selon le type de matière première. La meilleure équation utilisant des prédicteurs plus usuels (EMA = 3639 - 167,5 CB) est nettement moins efficace (R² = 0,90 ; écart-type résiduel = 100 kcal/kg MS).

Le cas des protéagineux non amyliacés. Plus compliquée est l'application d'équations communes à plusieurs groupes de matière première dont certains constituants sont de digestibilité très variable. Dans ce cas, il est nécessaire d'introduire un facteur correcteur dans l'équation, adapté aux niveaux de digestion spécifiques à chaque groupe de matières premières. Cette approche a été effectuée sur un ensemble de 4 groupes de matières premières, qui consistaient en tourteaux de soja, tournesol et colza (O), et farines de luzerne. Les facteurs correcteurs spécifiques à chaque groupe ont été calculés à l'aide d'équations théoriques, et à l'aide de la mesure de la digestibilité des protéines d'un seul échantillon de chaque groupe. Pour la mise au point de l'équation [EM = f (PB, Lip, ENA_{PAR})], l'équivalence suivante est appliquée à chacun des 4 échantillons mesurés pour la digestibilité de leurs protéines :

$$\text{EMA} = d \times 42,85 \times \text{PB} + 81,96 \times \text{Lip.} + e \times \text{ENA}_{\text{PAR}}$$

avec d = digestibilité des protéines

PB = % de protéine brute

42,85 = EMAn de protéines digérées à 100 %

81,96 = coefficient des lipides de l'équation CEE (tableau 4).

Lip. = % de lipide mesuré sans extraction acide

ENA_{PAR} = 100 - PB - Lip. - Cendres - PAR

e = inconnue

La moyenne (25,58) des 4 chiffres e sert à construire l'équation :

$$\text{EMA} = p \times \text{PB} + 81,96 \times \text{Lip.} + 25,58 \times \text{ENA}_{\text{PAR}}$$

On obtient une valeur p pour tous les échantillons de chaque groupe et une valeur p_i pour la moyenne par groupe. On calcule ensuite la régression linéaire multiple à l'aide des variables (p_i × PB), (Lip) et (ENA_{PAR}) pour aboutir à l'équation 1 (tableau 3).

L'équation [EM = f (EB, PB, PAR)] a été construite à l'aide de l'équation théorique T1 (tableau 4) décrite par ailleurs (Carré *et al* 1984). Les valeurs EB_{PAR} apparaissant dans cette équation théorique ont été mesurées pour chaque groupe sur des parois végétales isolées (soja, tournesol et colza non décortiqués, luzernes : 4197, 4689, 4575, 4628 kcal/kg). La valeur attribuée au facteur A de l'équation théorique (Carré *et al* 1984) a été calculée comme inconnue de l'équation T₁, les valeurs des autres variables de T₁ provenant des mesures expérimentales effectuées sur le soja.

Cette valeur A étant fixée, le coefficient B_i de PB a été calculé pour chaque groupe comme inconnue de cette même équation théorique. On calcule ensuite la régression linéaire multiple avec les variables (EB^{1,1}), (EB_{PAR} × PAR), (B_i × PB). L'adjonction de l'exposant 1,1 à EB permet d'éliminer la constante de l'équation expérimentale, ce qui nous met en conformation plus étroite avec l'équation théorique. L'équation obtenue (2) est présentée en tableau 3.

L'équation [EM = f (Lip., Cendres, Parois)] a été obtenue à l'aide de l'équation théorique T₂ (tableau 4) décrite par ailleurs (Carré 1990).

Les prédictions (tableau 3) ne présentent pas de biais en fonction des groupes. Les écarts les plus importants sont observés avec les colzas et luzernes, responsables des écart-types résiduels (ETR) relativement importants (≈ 100 kcal/kg MS ; tableau 3) qui cachent la bonne précision obtenue sur les sojas et tournesols. Les écarts

entre les variances résiduelles et la variance de la moyenne des EM expérimentales sont plus élevés que lors de prévisions portant sur des régimes complets ou des produits céréaliers. Ceci indique qu'il existait une variabilité importante de la digestibilité des nutriments (probablement les protéines) à l'intérieur même des groupes, variabilité qui, évidemment, n'a pu être prédite à l'aide des critères utilisés. Seule une méthode capable de prédire la digestibilité des protéines pourrait encore améliorer la précision des prédictions appliquées aux protéagineux non amyliques.

La plupart des équations basées sur le paramètre PAR présentent une bonne sécurité pour les applications « hors norme ».

Les équations du tableau 3 présentent un net progrès par rapport à la plupart des équations rapportées jusqu'à présent sur ces types de matière première. En effet, elles rendent compte de la variabilité de la totalité des nutriments (protéines, lipides et glucides), directement ou indirectement, ce qui leur confère une bonne sécurité pour les applications « hors norme ». L'autre avantage concerne le large domaine d'application des équations, utilisables jusqu'à des taux respectifs de lipides et de parois de 6 et 56 % /MS. L'équation (2) peut même être étendue à des taux de lipides largement supérieurs à 6 %. De plus, il est probable que l'équation (2) est également applicable aux tourteaux de colza et tournesol dépelliculés en substituant le facteur b_s à b_T ou b_C .

Les 3 équations données au tableau 3 s'apparentent à des équations théoriques en s'y conformant plus ou moins étroitement. L'équation (1) est du type CEE (tableau 4) et présente des coefficients qui ne sont pas trop éloignés de coefficients théoriques attendus. L'équation (2) s'apparente à l'équation théorique T₁ (tableau 4) avec un coefficient A aligné sur celui du soja, et surestimé pour les autres matières premières; cette surestimation est compensée par une valeur négative du coefficient de PB plus élevée qu'attendu pour les

matières premières autres que le soja. Les équations (1) et (2) s'analysent relativement facilement et peuvent donc être modifiées pour d'éventuelles applications à des produits particuliers. Ce n'est pas le cas de l'équation (3) qui présente des facteurs assez éloignés des chiffres théoriques attendus, tout particulièrement pour les lipides et les cendres. A ce titre, l'équation (3) reste peu manipulable et demeure pour une part empirique. Il est donc préférable d'en respecter strictement le domaine d'application.

Il est clair que, des 3 équations, c'est la deuxième qui est la plus efficace et la plus « robuste », dans la mesure où son domaine d'application est celui qui est le moins limité. Comme bien souvent en matière de prédiction énergétique, c'est donc une équation basée sur EB qui présente le plus d'intérêt. Quand bien même ce dernier critère semblerait fastidieux à mesurer, celui-ci gagnerait à être déterminé plus souvent, vu le gain qu'il peut apporter en justesse et précision. Il convient de rappeler que l'automatisme et la rapidité de mise en œuvre des bombes calorimétriques n'a cessé de progresser. De même, la méthode de détermination des parois s'est considérablement simplifiée (Carré et Brillouet 1989) pour devenir maintenant adaptée à la mesure en routine. L'emploi conjoint de EB et PAR est donc maintenant possible.

Conclusion

En comparaison avec les systèmes usuels basés sur les nutriments utilisables (protéines, amidon, lipides, sucres) ou la cellulose brute, les systèmes utilisant EB et PAR apportent un progrès notable en matière de prédiction de la valeur énergétique des aliments destinés à l'aviculture.

Tableau 4. Equations de prédiction des énergies métabolisables (EMA_n) des aliments pour volailles mesurées chez le coq adulte. Les valeurs sont exprimées par rapport à la matière sèche, en kcal/kg et %.

Equations théoriques de prédiction de l' EMA_n (adultes), basées sur le critère PAR			
Equations Références			
T1	Carré <i>et al</i> 1984	$EMA_n = A (EB - EB_{PAR} \times PAR) - B \times PB$	
T2	Carré 1990	$EMA_n = A (4203 + 52,9 \times L - 41,7 \times Ce - 41,7 \times PAR)$	
Equations expérimentales de prédiction de l' EMA_n (adultes) des régimes complets			
Equations Références			
CEE	Fischer et Mc Nab 1987	$EMA_n = 37,05 \times PB + 81,96 \times L_B + 39,87 \times Am + 31,08 \times S$	n = 189
PAR ₁	Carré et Brillouet 1989	$EMA_n = 0,9362 \times EB - 15,38 \times PB - 25,16 \times PAR^{1,2}$	ETR = 53 ; n = 48
PAR ₂	Carré et Brillouet 1989	$EMA_n = 3985 + 47,02 \times L_A - 53,07 \times Ce - 44,62 \times PAR$	ETR = 61 ; n = 48
Domaine d'application des équations PAR :			
2600 kcal/kg MS < EMA_n < 4000 kcal /kg MS			
10 % MS < PB < 30 % MS			
9 % MS < PAR < 25 % MS			
3 % MS < Ce < 14 % MS			

PB : protéines brutes (N \times 6,25) ; L_B : extrait éthéré avec extraction acide ; L_A : extrait éthéré sans extraction acide ; Am : amidon ; S : sucres ; EB : énergie brute des aliments ; PAR : parois végétales insolubles dans l'eau (Carré et Brillouet 1989 ; AFNOR 1989) ; Ce : cendres ; EB_{PAR} : énergie brute des parois ; A : digestibilité de l'énergie brute des constituants non pariétaux ; B : énergie brute de l'acide urique excrété, en équivalent de protéine ingérée.

Références bibliographiques

- AFNOR 1989. Aliments des animaux. Détermination de la teneur en parois végétales insolubles dans l'eau : Norme expérimentale NF V 18 111. AFNOR, Paris.
- BOLTON W., DEWAR W.A., 1962. The absorption of lactate by the fowl. Proceedings of the 12th World's Poultry Congress, 10-18 august, 1962, Sydney. p 117-119. Australian Branch of W.P.S.A., North-Sydney.
- BOLTON W. DEWAR W.A., 1965. The digestibility of acetic, propionic and butyric acids by the fowl. Brit. Poultry Sci., 6, 103-105.
- BOURDILLON A., CARRÉ B., CONAN L., FRANCESCH M., FUENTES M., HUYGHEBAERT G., JANSSEN W.M.M.A., LECLERCQ B., LESSIRE M., McNAB J., RIGONI M., WISEMAN J., 1990. European reference method of *in vivo* determination of metabolizable energy in poultry: reproducibility, effect of age, comparison with predicted values, Brit. Poultry Sci., in the press.
- CARRÉ B., 1990. Predicting the dietary energy value of poultry feeds. Feedstuff evaluation, Wiseman J. and Cole D.J.A. editors p. 283-300. Butterworths, London.
- CARRÉ B., BRILLOUET J.M., 1986. Yield and composition of cell wall residues isolated from various feedstuffs used for non-ruminant farm animals. J. Sci. Food Agric., 37, 341-351.
- CARRÉ B., BRILLOUET J.M., 1989. Determination of water-insoluble cell walls in feeds: interlaboratory study. J. Ass. Off. Analyt. Chem., 72, 463-467.
- CARRÉ B., LECLERCQ B., 1985. Digestion of polysaccharides, protein and lipids by adult cockerels fed on diets containing a pectic cell wall material from white lupin (*Lupinus albus* L.) cotyledon. Brit. J. Nutr., 54, 669-680.
- CARRÉ B., PREVOTEL B., LECLERCQ B., 1984. Cell wall content as a predictor of metabolizable energy value of poultry feedingstuffs. Brit. Poultry Sci., 25, 561-572.
- CARRÉ B., PEREZ J.M., LEBAS F., 1988. Mesure des fibres végétales dans les aliments pour animaux. Institut de Recherches Technologiques Agro-alimentaires des Céréales, Paris.
- CARRÉ B., DEROUET L., LECLERCQ B., 1990. Digestibility of cell wall polysaccharides from wheat (bran or whole grain), soybean and white lupin meal in cockerels, Muscovy ducks and rats. Poultry Sci., in the press.
- CONAN L., CARRÉ B., 1989. Effect of autoclaving on metabolizable energy value of smooth pea seed (*Pisum sativum*) in growing chicks. Anim. Feed Sci. Technol., 26, 337-345.
- DAIBER K.H., 1975. Enzyme inhibition by polyphenols of sorghum grain and malt. J. Sci. Food. Agric., 26, 1399-1411.
- DE GROOTE G., KETELS E., HUYGHEBAERT G., 1987. The energy evaluation of fats in poultry diets: new developments. Proceedings of the 6th European Symposium on Poultry Nutrition, 11-15 october 1987, Königslutter, F R Germany, p. C21-C30. German branch of the W.P.S.A., Celle.
- FARRELL D.J., 1980. The rapid method of measuring the metabolizable energy of feedstuffs. Feedstuffs, november 3, 24-25.
- FISHER C., MC NAB J.M., 1987. Techniques for determining the metabolizable energy (ME) content of poultry feeds. Recent advances in animal nutrition - 1987, Haresign, W. and Cole, D.J.A. editors. p. 3-18. Butterworths, London.
- HARTEL H., 1979. Methods to calculate the energy of mixed feeds. Proceedings of the 2nd European Symposium on Poultry Nutrition, 8-11 octobre 1979, Beekbergen, the Netherlands. p. 6-13. Kan C.A. and Simons, P.C.M. editors. Dutch branch of the W.P.S.A., Spelderholt Institute for Poultry Research, Beekbergen, the Netherlands.
- HUYGHEBAERT G., DE MUNTER G., DE GROOTE G., 1988. The metabolizable energy (AME₀) of fats for broilers in relation to their chemical composition. Anim. Feed Sci. Technol., 20, 45-58.
- INRA 1989. L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles. INRA, Paris.
- JANSSEN W.M.M.A. 1976. Research on the metabolizable energy of feedstuffs for poultry and on the relation between the metabolizable energy and the chemical composition. Rapport 121.76 Afdeling Voeding, Spelderholt Centre for Poultry Research and Extension, Beekbergen, The Netherlands.
- JANSSEN W.M.M.A. 1985. Prediction of the energy content of fats from chemical analysis. Proceedings of the 5th European Symposium on Poultry Nutrition, 27-31 october, 1985, Ma'ale Hachamisha. Bornstein, S. editor. pp. 191 A-191 D. Israel Branch of the W.P.S.A., Jerusalem.
- LESSIRE M., 1985. Huiles et tourteaux d'oléagineux dans l'alimentation des volailles. Aliscope, 7-12.
- LESSIRE M., LECLERCQ B., 1983. Metabolizable energy content of meat meal for chicken. Archiv für Geflügelkunde, 47, 1-3.
- LESSIRE M., SAUVEUR B., GUILLAUME J., CONAN L., MALLET S., 1980. Premiers résultats sur la valeur énergétique du pois protéagineux chez le coq et le rat. Industries de l'Alimentation Animale, 337, 47-52.
- LESSIRE M., LECLERCQ B., CONAN L., HALLOUIS J.M., 1985. A methodological study of the relationship between the metabolizable energy values of two meat meals and their level of inclusion in the diet. Poultry Sci., 64, 1721-1728.
- MAC AULIFFE T., MC GINNIS J., 1971. Effect of antibiotic supplements to diets containing rye on chick growth. Poultry Sci., 50, 1130-1134.
- MATEOS G.G., SELL J.L., 1980. True and apparent metabolizable energy value of fat for laying hens: influence of level of use. Poultry Sci., 59, 369-373.
- NYMAN M., SILJESTRÖM M., PEDERSEN B., BACH KNUDSEN K.E., ASP N.G., JOHANSSON C.G., EGGUM O., 1984. Dietary fiber content and composition in six cereals at different extraction rates. Cereal Chem., 61, 14-19.
- PAPADOPOULOS M.C., 1985. Estimations of amino-acid digestibility and availability in feedstuffs for poultry. World's Poultry Sci. J., 41, 64-71.
- SAINI H.S., HENRY R.J., 1989. Fractionation and evaluation of triticale pentosans: comparison with wheat and rye. Cereal Chem., 66, 11-14.
- SHANNON D.W.F., 1971. The effect of level of intake and free fatty acid content on the metabolizable energy value and net absorption of tallow by the laying hen. J. Agric. Sci., (Camb), 76, 217-221.
- Table européenne: European table of energy values for poultry feedstuffs 1986 Janssen, W.M.M.A. editor. W.P.S.A., Beekbergen, the Netherlands.
- TITUS H.W., 1955. The scientific feeding of chickens. 3rd edition. The Interstate, Danville, U.S.A.
- WISEMAN J., LESSIRE M., 1987a. Interactions between fats of differing chemical content: apparent metabolizable energy values and apparent fat availability, Brit. Poultry Sci., 28, 663-676.
- WISEMAN J., LESSIRE M., 1987b. Interactions between fats of differing chemical content: apparent availability of fatty acids. Brit. Poultry Sci., 28, 677-691.

Summary

Predicting the dietary energy value of raw materials used in poultry production.

The equations developed by INRA for predicting the energy values of 10 groups of raw materials used in poultry production are shown here. Difficulties usually encountered when establishing such equations are described. These difficulties are at the origin of new methods used for calculating equations. The new equations are less empirical and also less specialized. The use of a water-insoluble cell-wall (WICW) determination enabled these new systems to be developed.

CARRÉ B. 1990. La prediction de la valeur énergétique des matières premières destinées à l'aviculture. INRA Prod. Anim., 3 (3), 163-169.