

Les systèmes d'appréciation de la valeur énergétique des aliments pour le porc

L'alimentation représente plus de la moitié des coûts en production porcine, l'apport d'énergie en étant la composante la plus importante. Sur un plan pratique, il est donc nécessaire d'évaluer précisément la teneur en énergie des aliments afin de "classer" les aliments entre eux pour les besoins de la formulation et d'adapter les apports énergétiques aux besoins des animaux.

L'énergie brute (EB) de l'aliment consommé n'est pas totalement disponible pour les besoins de l'animal. Ainsi, une partie de l'énergie de l'aliment n'est apparemment pas digérée et est excrétée dans les fèces. De plus, la dégradation par fermentation d'une partie de l'énergie ingérée induit la production de gaz (méthane, hydrogène). Par ailleurs, l'excrétion urinaire entraîne des pertes d'énergie liées essentiellement au métabolisme protéique. Enfin, l'utilisation métabolique de l'énergie alimentaire s'accompagne d'une production de chaleur (ou extra-chaleur) liée directement à la quantité d'énergie ingérée et

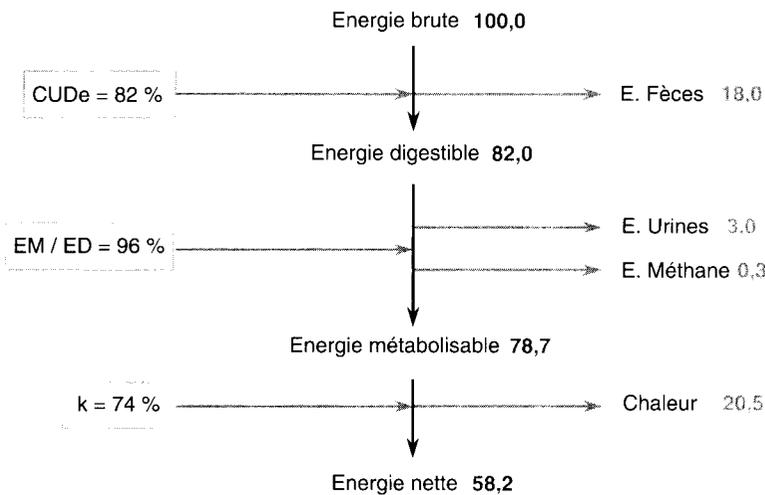
à la nature des nutriments métabolisés. Ces différentes étapes de l'utilisation de l'énergie et les valeurs moyennes mesurées chez le porc en croissance sont résumées à la figure 1. Le rapport entre la teneur en énergie digestible (ED) et la valeur EB correspond au coefficient d'utilisation digestive de l'énergie (CUDe) alors que le rapport entre la teneur en énergie nette (EN) et la teneur en énergie métabolisable (EM) est défini comme le rendement d'utilisation de l'EM (k). Il en résulte que la valeur énergétique d'un aliment est exprimée en termes d'ED, d'EM ou d'EN avec, pour chacune de ces trois étapes, des modes de prédiction différents. En définitive, un système énergétique correspond à la combinaison d'une étape et d'un mode de prédiction de la valeur énergétique des aliments.

Résumé

Pour un même aliment, il peut être attribué différentes valeurs énergétiques selon l'étape de l'utilisation de l'énergie qui est considérée (énergie digestible: ED, énergie métabolisable : EM ou énergie nette : EN) et selon le mode de prédiction au niveau de chaque étape. Dans la première partie de cet article, les effets de la composition de l'aliment et de facteurs liés à l'animal (âge, poids vif, ...) sur l'utilisation digestive et métabolique de l'énergie sont analysés de façon à présenter, dans une deuxième partie, les différents systèmes d'appréciation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. Dans la dernière partie, les avantages, les limites et la mise en pratique des systèmes énergétiques sont analysés de manière comparative. Il en ressort que la hiérarchie entre régimes et surtout entre matières premières et, par conséquent, les résultats de la formulation sont fortement dépendants du système énergétique adopté.

L'objet de cette revue est, dans un premier temps, d'analyser les principaux facteurs de variation du CUDe, du rapport EM/ED et du rendement k pour présenter, dans une deuxième partie, les différents systèmes d'appréciation de la valeur énergétique des aliments. La troisième partie concerne la comparaison des différents systèmes. Les aspects méthodologiques liés à l'appréciation de la valeur énergétique des aliments, plus longuement présentés par Noblet et Henry (1991), sont abordés de façon succincte.

Figure 1. Etapes de l'utilisation de l'énergie et valeurs moyennes chez le porc en croissance (à partir de Noblet et al 1989)



1 / Utilisation de l'énergie des aliments : étapes successives et facteurs de variation

1.1 / Utilisation digestive

Le CUDe varie entre 70 et 90% pour la plupart des régimes utilisés chez le porc (Noblet et al 1989) et entre 0 (paille de blé, par exemple) et 100% (amidon de maïs, par exemple) pour les matières premières (Noblet et al 1993a). Ces variations résultent de différences d'utilisation digestive des nutriments constitutifs de la matière organique. La digestibilité des matières azotées et des matières grasses varie entre 60 et 95%, en relation avec leurs caractéristiques chimiques. Ainsi, le degré d'insaturation des matières grasses est corrélé positivement avec leur digestibilité (Wiseman et al 1990). Les glucides solubles (amidon, sucres) sont hautement digestibles (95 à 100%) (Noblet et al 1993a). En fait, la variabilité du CUDe d'un aliment est avant tout liée à la nature et à l'importance de ses glucides de structure ou parois végétales qui correspondent à la somme des polysaccharides non-amylacés (PNA) et de la lignine (Carré 1991). En effet, les parois végétales ont une digestibilité plus faible que les autres constituants chimiques. De plus, l'utilisation digestive des parois végétales est variable selon leur origine. Ainsi, les PNA de la paille de blé, du son de blé, de la pulpe de betterave et des coques de soja ont une digestibilité de respectivement 16, 46, 69 et 79% (Chabeauti et Noblet 1990). Il est généralement admis que la lignine est indigestible chez le porc (Perez 1991). Il s'ensuit que le CUDe diminue linéairement avec la teneur en parois végétales de l'aliment, la réduction étant variable selon l'origine des parois végétales et selon l'importance de la lignine (Perez 1991 ; figure 2).

La variabilité liée à l'origine des parois végétales provient de différences dans leur structure chimique. Schématiquement, les

PNA comprennent trois classes essentielles: les hémicelluloses, la cellulose et les substances pectiques (Carré 1991). Parmi ces trois classes, les substances pectiques sont les plus digestibles (80% selon Graham et al 1986 ou Chabeauti et al 1991) alors que les hémicelluloses ont une digestibilité généralement supérieure à la cellulose, les valeurs variant avec l'origine botanique entre 30 et 60% (Chabeauti et al 1991). Il est donc évident qu'une information sur la quantité de parois végétales complétée par des résultats sur leur nature peuvent être encore insuffisants pour analyser les effets des parois végétales sur le CUDe. De plus, la variation de la digestibilité des autres constituants chimiques et/ou des sécrétions endogènes avec la nature des parois végétales ne peut être prise en considération.

Une difficulté supplémentaire est liée aux limites des méthodes d'analyse des parois végétales. La méthode la plus ancienne conduit à la définition d'un résidu connu sous le terme de cellulose de Weende et qui correspond, en première approximation, à la somme de la cellulose et de la lignine. Un deuxième groupe de méthodes basées sur l'utilisation de détergents (Van Soest et Wine 1967) permet d'isoler une série de résidus correspondant approximativement à la somme des hémicelluloses, de la cellulose et de la lignine (NDF), à la somme de la cellulose et de la lignine (ADF) et à un estimateur de la lignine (ADL). Les substances pectiques ne sont prises en compte dans aucune de ces méthodes. Un autre groupe de méthodes permet de mesurer l'ensemble des parois végétales, la plus récente étant celle proposée par Carré et Brillouet (1989) et qui consiste à déterminer, par voie enzymatique, l'ensemble des parois végétales insolubles dans l'eau (WICW). Enfin, dans un dernier groupe

Le CUDe d'un aliment varie surtout en fonction de sa teneur en parois végétales et de leur nature.

Figure 2. Influence de l'addition d'une source de parois végétales à un régime de base sur le coefficient d'utilisation digestive de l'énergie (CUDe) chez le porc (à partir de Chabeauti et al 1991).

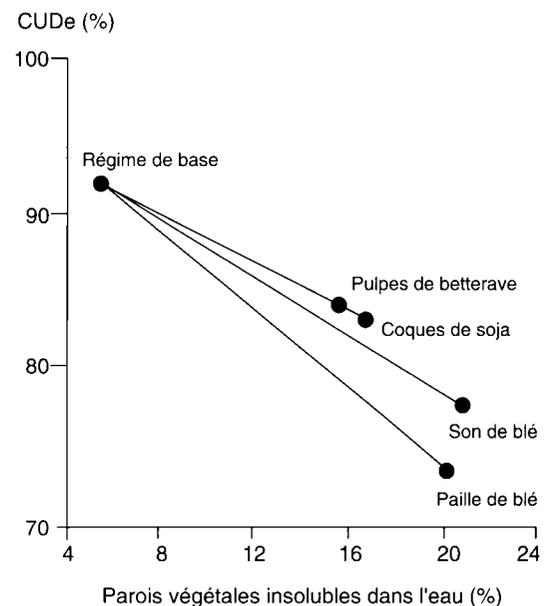


Tableau 1. Influence de la composition du régime¹ (g/kg MS) sur le coefficient de digestibilité de l'énergie (CUDe, %) chez le porc en croissance.

N°	Equation	ETR	Référence
1	$CUDe = 93,8 - 0,128 \times ADF - 0,064 \times (NDF-ADF)$	1,6	Perez <i>et al</i> 1984
2	$CUDe = 97,5 - 0,116 \times NDF$	2,0	Noblet <i>et al</i> 1989
3	$CUDe = 104,9 - 0,136 \times MM - 0,100 \times NDF$	1,6	Noblet <i>et al</i> 1989
4	$CUDe = 100,5 - 0,079 \times MM - 0,088 \times NDF - 0,118 \times ADL$	1,5	Noblet et Perez 1993

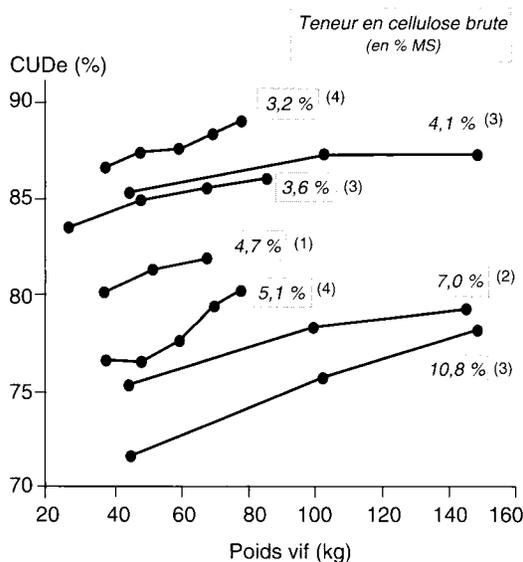
¹ MM : matières minérales, NDF : Neutral Detergent Fibre, ADF : Acid Detergent Fibre, ADL : Acid Detergent Lignin.

de méthodes, on s'attache à déterminer les teneurs en oses constitutifs des parois végétales, chaque ose étant plutôt caractéristique de l'une des trois classes définies ci-dessus.

Malgré ces difficultés d'ordre méthodologique, on peut cependant proposer des relations moyennes mettant en relation le CUDe et des estimateurs des parois végétales (tableau 1). Les meilleures relations sont obtenues avec les critères NDF ou WICW. Dans le cas du porc, l'avantage du critère WICW sur le critère NDF est moins évident que chez le poulet (Carré *et al* 1984, Perez 1990, Noblet et Perez 1993) dans la mesure où les substances pectiques sont bien digérées chez le porc. Par ailleurs, il est évident que ces relations moyennes sous-estiment ou surestiment le CUDe lorsque l'utilisation digestive des parois végétales est très différente des valeurs moyennes mesurées sur un ensemble de régimes (Noblet et Perez 1993). Pour la même raison, ces relations ne sont pas applicables aux matières premières. De façon encore inexplicée, les matières minérales ont un effet négatif sur le CUDe.

Les équations rapportées au tableau 1 suggèrent que les parois végétales ont un effet comparable à celui d'un diluant puisque le CUDe diminue d'approximativement un point par point de NDF. Or, la digestibilité moyenne du NDF des régimes utilisés pour établir ces équations est voisine de 50%. Il apparaît donc que, même si le porc en croissance est en mesure de digérer une part importante des parois végétales, l'apport d'énergie pour l'animal est négligeable en raison notamment d'un accroissement de l'excrétion de composés endogènes (Noblet et Shi 1993).

D'autres facteurs non liés directement à la composition de l'aliment sont susceptibles d'affecter l'utilisation digestive de l'énergie de l'aliment. Ainsi, une réduction du niveau d'alimentation s'accompagne d'une augmentation du CUDe, la variation n'étant importante que lorsque la modification du niveau d'alimentation est drastique et/ou les animaux sont jeunes et/ou le régime est riche en parois végétales (Roth et Kirchgessner 1984, Everts *et al* 1986, Noblet *et al* 1993a). La variation la plus importante du CUDe d'un aliment donné est due à la différence de poids vif des animaux, l'écart étant d'autant plus important que l'aliment est riche en parois végétales (figure 3). A titre indicatif, dans l'intervalle de poids 40-100 kg, le CUDe augmente d'environ 0,30 et 0,45 point par tranche d'augmentation du poids vif de 10 kg pour des aliments contenant respectivement 4 et 6% de cellulose brute (Noblet *et al* 1993a). La combinaison d'une modification du niveau d'alimentation et d'une variation importante du poids des animaux peut conduire à des écarts importants de CUDe et de teneur en ED de l'aliment. Ainsi, le CUDe d'une même série de régimes distribués à des truies adultes à l'entretien et à des porcs en croissance alimentés libéralement est, en moyenne, 10% plus faible chez les animaux en croissance, l'écart pouvant être supérieur à 15% avec des régimes riches en parois végétales et, à l'inverse, très faible, avec des régimes très concentrés en énergie (Noblet et Shi 1993, Noblet *et al* 1993a). Si l'on s'intéresse aux matières premières, l'écart peut encore devenir plus important puisque, dans la même étude, les CUDe du son de blé, du corn gluten feed ou de la pulpe de betterave mesurés chez le porc en croissance représentent respectivement 81, 72 et 61% des valeurs obtenues chez la truie (Shi et Noblet 1993).

Figure 3. Influence du poids vif sur le coefficient d'utilisation digestive de l'énergie (CUDe) en relation avec le taux de cellulose brute

(1) Roth et Kirchgessner 1984 ; (2) Jentsch *et al* 1989
(3) Noblet *et al* 1993 ; (4) Noblet *et al*, non publié

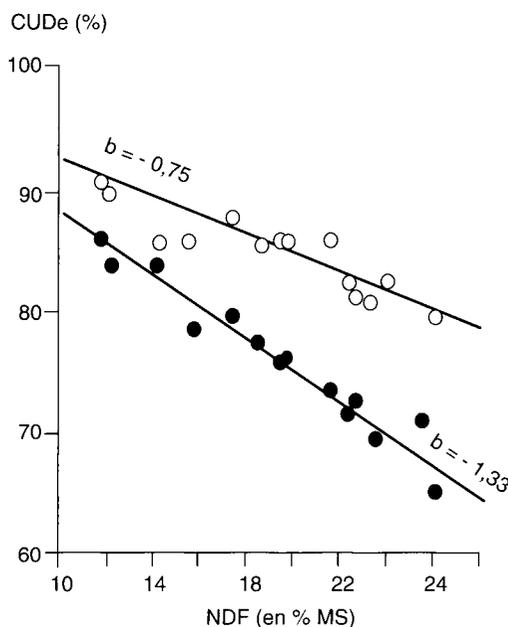
Le CUDe augmente avec le poids vif de l'animal.

Tableau 2. Influence de la composition du régime¹ (g/kg MS) sur le rapport EM/ED (%) chez le porc en croissance.

N°	Equation	Référence
5	EM/ED = 99,7 - 0,019 x MAT	Morgan <i>et al</i> 1975
6 ²	EM/ED = 99,8 - 0,020 x MAT	Noblet <i>et al</i> 1989
7 ²	EM/ED = 100,7 - 0,021 x MAT - 0,005 x NDF	Noblet <i>et al</i> 1989
8	EM/ED = 100,3 - 0,021 x MAT	Noblet et Perez 1993

¹ MAT : matières azotées totales, NDF: Neutral Detergent Fibre.

² Les pertes sous forme de méthane sont prises en compte.

Figure 4. Influence de la teneur en parois végétales (NDF) sur le coefficient d'utilisation digestive de l'énergie (CUDe) chez la truie adulte alimentée à son niveau d'entretien (○) et le porc en croissance alimenté libéralement (●) (à partir de Noblet et Shi 1993).

Ces résultats traduisent des effets variables des parois végétales sur le CUDe (figure 4). En fait, ils apparaissent comme d'autant plus importants que les animaux sont jeunes ou que le niveau d'alimentation est élevé ou, en d'autres termes, que le transit digestif est rapide ou que la capacité digestive au niveau du gros intestin est faible. Il en résulte que pour les matières premières riches en parois végétales et, dans une moindre mesure, en matières grasses, le CUDe ne peut pas être considéré comme constant pour toutes les situations rencontrées en pratique (Noblet *et al* 1993a).

1.2 / Rapport EM/ED

Le passage de l'ED à l'EM implique la prise en compte des pertes d'énergie sous forme de gaz de fermentation (méthane) et dans les urines. Chez le porc en croissance pesant environ 45 kg, la production de méthane représente environ 0,4% de l'apport d'ED, les valeurs

les plus élevées (1%) étant obtenues avec des régimes riches en parois végétales digestibles (pulpes de betterave, coques de soja) (Noblet *et al* 1989). La production de méthane augmente avec le poids vif: 0,5, 0,7 et 0,8 % de l'ED respectivement chez des porcs de 45, 100 et 150 kg (Noblet *et al* 1993a). La production la plus élevée est observée chez des truies adultes alimentées de façon restreinte (1,4% de l'ED contre 0,4% chez des porcs en croissance de 45 kg recevant les mêmes régimes). Il n'existe toutefois pas de relation claire entre la production de méthane et la quantité de parois végétales dégradées ou la quantité d'énergie digérée au niveau du gros intestin (Noblet *et al* 1993a).

L'énergie excrétée dans les urines est avant tout fonction de l'importance de l'excrétion azotée urinaire et, par conséquent, de l'adéquation des apports azotés aux besoins de l'animal. Aussi, à un stade donné de la vie de l'animal, l'excrétion d'azote s'accroît linéairement avec l'augmentation de la teneur en protéines de l'aliment. Le rapport EM/ED dépend alors directement de la teneur en protéines de l'aliment (tableau 2). Dans la mesure où la rétention azotée varie avec le poids ou le stade physiologique des animaux, le rapport EM/ED décroît avec l'augmentation du poids des animaux, les écarts extrêmes étant mesurés entre des porcs en croissance rapide et des animaux adultes à l'entretien recevant les mêmes régimes. Dans ces deux situations extrêmes, la perte d'énergie dans les urines représente respectivement 3,3 et 6,5% de l'apport d'ED (Noblet et Shi 1993, Noblet *et al* 1993a).

En pratique, le rapport EM/ED est voisin de 96% chez le porc en croissance pour la plupart des régimes. Toutefois, une telle valeur moyenne ne peut s'appliquer à des matières premières dont la teneur en protéines est très différente de la teneur moyenne des régimes. Ainsi, le rapport EM/ED peut varier de 100% pour des graisses à 97-98% pour les céréales, 93-96% pour les sources de protéines et 90-92% pour des matières premières riches en protéines et en fibres (Noblet *et al* 1990). Par ailleurs, la diminution du rapport EM/ED constatée avec l'augmentation du poids vif des animaux atténue l'amélioration parallèle du CUDe, de sorte que l'écart de valeur énergétique entre animaux de poids vifs ou de stades physiologiques différents est plus faible sur la base de la teneur en EM que de la valeur ED (Noblet *et al* 1993a).

Le rapport EM/ED est d'abord fonction de la teneur en MAT du régime. Il varie ensuite selon le type d'animal et son stade physiologique.

1.3 / Utilisation métabolique de l'énergie

La teneur en EN d'un aliment est égale à la différence entre sa teneur en EM et l'extrachaleur associée aux processus d'ingestion, de digestion et d'utilisation métabolique. L'énergie apportée à l'animal permet de couvrir des besoins en énergie très différents (entretien, dépôt de protéines ou de lipides, gain de poids, production de lait, ...) pour lesquels l'extrachaleur est variable. Ainsi, pour des régimes à base de céréales et de soja, le rendement d'utilisation de l'EM est voisin de 72% pour la production de lait (Noblet et Etienne 1987), de 75% pour l'énergie du gain pondéral et de 80 et 60% respectivement pour les dépôts de lipides et de protéines chez le porc en croissance (Noblet *et al* 1991) et de 77% pour la couverture des dépenses d'entretien (Noblet *et al* 1993b). En plus de ces variations liées au type de "production", le rendement k varie avec la composition chimique de l'aliment ou la "nature" de l'EM. En d'autres termes, les rendements des différents éléments digestibles constitutifs de l'EM sont différents. En conséquence, la valeur EN d'un aliment variera avec le type de production, la hiérarchie entre aliments pouvant être, en théorie, différente selon le type de production.

En pratique, il est toutefois impossible d'étudier les variations de k dans toutes les situations de la production porcine. Il est donc nécessaire de choisir des situations "modèles" représentatives d'un maximum de situations. Dans le cas de l'animal en croissance, les données de la bibliographie montrent que k s'accroît avec la teneur en amidon ou en matières grasses du régime et diminue avec l'augmentation des teneurs en parois végétales ou en protéines (Schiemann *et al* 1972, Just 1982, Just *et al* 1983, Noblet *et al* 1989). Ces conclusions sont concrétisées dans la relation suivante (Noblet *et al* 1989):

$$k_{pr} (\%) = 67,4 + 0,051 \times MG + 0,019 \times \text{Amidon} - 0,018 \times \text{MAT} (R^2 = 0,61)$$

où MG, amidon et MAT correspondent aux teneurs en matières grasses, amidon et matières azotées totales, exprimées en g par kg de matière sèche. Dans le cas de la truie adulte à l'entretien, une relation similaire a pu être établie (Noblet *et al* 1993b):

$$k_m = 67,2 + 0,066 \times MG + 0,016 \times \text{Amidon} (R^2 = 0,57)$$

Les variations de k avec la composition chimique de l'aliment sont la conséquence de rendements d'utilisation des éléments digestibles très différents. Dans le cas du porc en croissance, les rendements sont estimés à 95, 85, 54, 57 et 0% pour respectivement les matières grasses digestibles, l'amidon, les matières azotées digestibles, les hémicelluloses digestibles et la teneur en ADF digestible (Noblet *et al* 1989). Pour la couverture des dépenses d'entretien, les valeurs sont relativement comparables (Noblet *et al* 1993b).

Même si le concept d'énergie nette est l'objectif final en matière d'estimation de la

valeur énergétique des aliments, les résultats évoqués ci-dessus mettent clairement en évidence les précautions à prendre. En particulier, la valeur EN d'un aliment ne se mesure pas directement et elle résulte de calculs et d'hypothèses (Noblet et Henry 1991). Aussi, au-delà des différences de rendements liées à la nature de la "production", les valeurs de k et les teneurs en EN sont dépendantes de la procédure d'évaluation. En conséquence, les teneurs en EN de la bibliographie ne sont généralement pas comparables entre elles. Ces aspects seront discutés plus largement dans la troisième partie de l'article.

2 / Les systèmes énergétiques

Comme indiqué ci-dessus, un système énergétique est la résultante d'une étape dans l'utilisation de l'énergie (ED vs EM vs EN) et, au sein de chaque étape, d'un mode d'évaluation. La situation est la plus complexe avec les systèmes EN pour lesquels interviennent non seulement la composition de l'aliment mais également la nature de la "production" et l'approche méthodologique.

2.1 / Energie digestible

La teneur en ED d'un aliment peut être déterminée directement en maintenant des porcs en cage de digestibilité afin de mesurer les quantités d'énergie perdues dans les fèces. Cette méthode a été utilisée pour l'établissement des valeurs rapportées dans les tables (INRA, 1989). Cependant, en pratique, on ne peut utiliser cette méthode compte tenu de sa lourdeur et du délai de réponse relativement long. La méthode la plus simple consiste alors à prendre les valeurs moyennes rapportées dans les tables. Mais elle se révèle insuffisante pour les matières premières, dont la composition chimique est très variable, et pour les régimes. Des approches alternatives sont nécessaires.

Pour les matières premières, la teneur en ED peut être calculée en additionnant la contribution des éléments digestibles, ceux-ci pouvant être calculés à partir des données de composition chimique et des coefficients de digestibilité des différents éléments nutritifs, rapportés dans les tables (CVB 1988). Des équations de prédiction ont ainsi été proposées (Schiemann *et al* 1972, Noblet *et al* 1989). Il est également possible d'estimer la teneur en ED d'un nombre limité de matières premières à partir de leurs caractéristiques chimiques. Quelques équations sont proposées au tableau 3.

Pour les régimes, la méthode la plus simple consiste à additionner les contributions des matières premières, en supposant l'absence d'interactions. Quand la composition centésimale de l'aliment est inconnue, les seules possibilités sont de recourir à des équations de prédiction en fonction de la composition chimique ou à des méthodes physiques (infra-rouge) ou enzymatiques (*in vitro*). Pour ces deux derniers groupes de méthodes, les don-

Le rendement de transformation de l'EM en EN varie selon le type d'animal et la composition de l'aliment : chaque élément digestible a un rendement d'utilisation différent.

Tableau 3. Equations de prédiction de la teneur en ED (MJ/kg MS) de quelques matières premières à partir de leurs caractéristiques de composition chimique (g/kg MS)¹.

N°	Aliment	Equation	R ²	Référence
9	Orge	ED = 17,04 - 0,046 x CB	0,92	Perez <i>et al</i> 1980
10	Céréales	ED = 15,60 + 0,0079 x MAT + 0,0244 x MG - 0,0356 x ADL	0,82	Wiseman et Cole 1980
11	Céréales	ED = -7,52 + 1,36 x EB - 0,012 x NDF	0,89	Batterham <i>et al</i> 1980a
12	Blé	ED = -4,35 + 1,17 x EB - 0,052 x CB	0,94	Batterham <i>et al</i> 1980a
13	Sous produits blé	ED = 17,75 - 0,042 x ADF	0,76	Batterham <i>et al</i> 1980a
14	Farine de viande	ED = -4,63 + 0,021 x MAT + 0,048 x MG	0,81	Batterham <i>et al</i> 1980b
15	Tourteau colza	ED = 17,28 + 0,020 x MG - 0,030 x CB	0,77	Bourdon 1986
16	Tourteau tournesol	ED = 16,85 - 0,033 x CB	0,92	Perez <i>et al</i> 1986
17	Manioc	ED = 18,41 - 0,046 x CB - 0,018 x MM	-	INRA 1984

¹ CB : cellulose brute, MAT : matières azotées totales, MG : matières grasses, EB : énergie brute, NDF : Neutral Detergent Fibre, ADF : Acid Detergent Fibre, ADL : Acid Detergent Lignin, MM : matières minérales.

Tableau 4. Equations de prédiction de la teneur en ED des régimes (MJ/kg MS) à partir des critères de composition chimique (g/kg MS) chez le porc en croissance¹.

N°	Constante	EB	MM	Coefficients de Régression			R ²	ETR	Référence
				MAT	MG	NDF			
18	5,75	0,740	-0,0299			-0,0177	0,87	0,28	Perez <i>et al</i> 1984
19	17,66		-0,0480	0,0090	0,0161	-0,0138	0,88	0,27	Perez <i>et al</i> 1984
20	5,62	0,692	-0,0223	0,0040		-0,0163		0,34	Morgan <i>et al</i> 1987
21	17,50		-0,0325	0,0078	0,0157	-0,0149		0,32	Morgan <i>et al</i> 1987
22	18,50		-0,0435	0,0056	0,0153	-0,0161	0,95	0,25	Noblet <i>et al</i> 1989
23	17,44		-0,0381	0,0079	0,0163	-0,0151	0,92	0,28	Noblet et Perez 1993

¹ Voir tableau 3 pour signification des sigles.

nées de la bibliographie restent insuffisantes et les résultats pas suffisamment répétables. Pour ce qui concerne les équations de prédiction basées sur la composition chimique (tableau 4), leur validité est liée aux conditions expérimentales de leur établissement (poids des animaux, représentativité des régimes, ...) et à la précision des analyses sur les aliments. Par ailleurs, ces équations ne peuvent pas prendre en compte les effets, par exemple, de l'origine des parois végétales ou du degré d'insaturation des matières grasses. Elles peuvent donc conduire à surestimer ou, au contraire, à sous-estimer la valeur ED de régimes contenant des matières premières atypiques sur le plan de leurs caractéristiques chimiques. De la même façon, elles ne sont pas applicables aux matières premières.

Un problème important sur le plan pratique concerne la comparaison de la valeur ED obtenue par additivité des valeurs ED des matières premières incorporées dans l'aliment (EDt) avec celle mesurée sur les animaux (EDm) ou celle calculée à partir de l'une des équations du tableau 4 (EDc). A partir des données de Noblet *et al* (1990) obtenues sur un ensemble de 17 régimes préparés à partir de 13 matières premières parfaitement caractérisées sur le plan de leur composition chimique et, par conséquent, de leur valeur "EDtables", on met en évidence que EDm (chez des porcs de 45 kg)

et EDc sont identiques, en moyenne, alors que la méthode d'additivité (EDt) surestime en moyenne de 5% la teneur en ED par rapport à la valeur obtenue sur les animaux (EDm). De plus, l'écart entre EDm et EDt est variable: faible pour les régimes simples contenant peu de parois végétales et très important avec des régimes complexes riches en parois végétales. Les différences résultent en fait d'une surestimation de la valeur ED des matières premières riches en parois végétales pour les animaux et dans les conditions (niveau d'alimentation libéral) de notre étude. La règle d'additivité des valeurs ED des matières premières est donc à appliquer avec précaution lorsque les aliments sont de type complexe en incluant notamment des matières premières riches en parois végétales, et lorsqu'ils sont distribués à des niveaux d'alimentation élevés et à des animaux jeunes.

En effet, nous avons montré ci-dessus que le CUDe d'un aliment varie avec le poids vif des animaux et, dans une moindre mesure, avec le niveau d'alimentation, l'amplitude de la variation dépendant elle-même des caractéristiques de l'aliment. Ces effets expliquent en partie les différences entre EDm et EDt mentionnées ci-dessus mais ils conduisent surtout à l'établissement de valeurs énergétiques liées au type d'animal auquel l'aliment est distribué. Des propositions ont été faites

La teneur en ED d'un aliment calculée à partir des valeurs ED de ses constituants est surestimée lorsque la teneur en parois végétales est élevée.

dans ce sens pour un nombre limité de matières premières et pour les régimes lorsqu'ils sont utilisés par le porc en croissance ou la truie adulte (Noblet *et al* 1993a, Noblet et Shi 1993, Shi et Noblet 1993). Des études en cours sur le porc en croissance entre 30 et 90 kg et une première synthèse de données de la bibliographie (Noblet *et al* 1993a) permettent de proposer des corrections dans le cas de l'animal en croissance.

2.2 / Energie métabolisable

Les approches pour estimer la valeur EM des matières premières et des régimes sont tout à fait comparables à ce qui a été décrit pour l'ED. En fait, dans de nombreux cas, la valeur EM est estimée directement à partir de la valeur ED en appliquant un rapport EM/ED, soit constant, soit variable avec la teneur en protéines de l'aliment. De plus, les pertes d'énergie sous forme de méthane sont généralement ignorées alors qu'elles peuvent représenter jusqu'à 4 à 5% de la teneur en ED pour quelques matières premières (coques de soja, par exemple). Les valeurs EM sont parfois "standardisées" pour un niveau de rétention azoté donné. Enfin, pour tenir compte d'un rendement moindre de l'EM des parois végétales pour la production d'EN, une correction prenant en compte l'importance des parois végétales dégradées par fermentation est appliquée (DLG 1984).

2.3 / Energie nette

Les systèmes énergétiques permettant de prédire la teneur en EN des aliments du porc sont en nombre limité. Le seul système disponible pour les animaux à l'entretien est celui proposé par Noblet *et al* (1993b) qui ne diffère pas de façon importante de celui mis au point selon la même approche par Noblet *et al* (1989) chez le porc en croissance. Pour ce qui concerne le porc en croissance, la teneur en EN correspond à une utilisation combinée de l'EM pour l'entretien et la croissance (Just 1975 et 1982, Just *et al* 1983, Ewan 1989, Noblet *et al* 1989) ou pour l'entretien et l'engraissement (Schiemann *et al* 1972). Les équations principales proposées par ces auteurs sont rapportées au tableau 5.

Le système proposé par Schiemann *et al* (1972) (ou système NEF) est basé sur des mesures de bilans énergétiques en chambres respiratoires chez des porcs pesant de 95 à 185 kg et déposant la presque totalité de leur énergie sous forme de lipides. Les variations de la composition chimique des 67 régimes étaient surtout associées à des différences dans la nature des glucides puisque seulement 6 régimes contenaient plus de 20% de matières azotées (en % de la matière sèche) et un seul plus de 4% de matières grasses. La teneur en EN est calculée à partir des teneurs en éléments digestibles, fractionnés selon la méthode de Weende (tableau 5). Outre les limites du mode de fractionnement et la faible variabilité dans la composition des régimes, il est probable que les résultats sont affectés par le fait que les mesures ont été réalisées chez des porcs de poids vifs variables et recevant des niveaux d'alimentation non constants. Or, ces deux paramètres affectent la validité d'un système EN (Noblet et Henry 1991).

Les études conduites au Danemark par Just et ses collaborateurs ont été réalisées chez des porcs de 20 à 90 kg, par la technique des abat-tages. La teneur en EN calculée à partir de la quantité d'énergie fixée et d'une estimation de la production de chaleur au jeûne (618 kJ/kg^{0,60}; 280 kJ/kg^{0,75} dans le système NEF; 750 kJ/kg^{0,60} dans le système de Noblet *et al* 1989). La teneur en EN d'un aliment est alors calculée à partir de sa teneur en EM (tableau 5). L'ordonnée à l'origine négative dans l'équation signifie que le rendement d'utilisation de l'énergie est d'autant plus élevé que le régime a une forte concentration en énergie.

Le système proposé par Noblet *et al* (1989) repose sur des mesures de bilans énergétiques en chambres respiratoires réalisées chez des porcs de 45 kg. L'étude portait alors sur 41 régimes. De nouvelles équations calculées à partir de 61 régimes seront publiées prochainement. Trois approches ont été utilisées pour la prédiction de la teneur en EN des aliments (tableau 5). La première est comparable à celle de Schiemann *et al* (1972) avec toutefois des modes de fractionnement plus complets (prise en compte notamment de la teneur en amidon). La seconde se rapproche de celle proposée par Just (1975, 1982) et prend en compte

La teneur en EN peut être calculée à partir de la teneur en ED ou en EM et de quelques caractéristiques chimiques de l'aliment.

Tableau 5. Equations de prédiction de la teneur en EN (MJ/kg MS) des aliments pour le porc ¹.

N°	Equation	CV, %	Référence
24	EN _r = 0,0109 x MAD + 0,0361 x MGD + 0,0090 x CBD + 0,0125 x ENAD	3,8	Schiemann <i>et al</i> 1972
25	EN = 0,75 x EM - 1,88	2,3	Just 1975, 1982
26	EN _j = 0,81 x EM - 2,20	3,6	Just <i>et al</i> 1983
27	EN ₆ = 0,0104 x MAD + 0,0370 x MGD + 0,0148 x Amidon - 0,0041 x CBD + 0,0118 x ResD	2,2	Noblet <i>et al</i> 1989
28	EN _{6b} = -1,52 + 0,0125 x MAD + 0,0398 x MGD + 0,0165 x Amidon + 0,0141 x ResD	2,0	Noblet <i>et al</i> 1989
29	EN ₁₉ = 0,663 x ED - 0,0039 x MAT + 0,0095 x MG - 0,0056 x CB + 0,0032 x Amidon	1,8	Noblet <i>et al</i> 1989
30	EN ₂₆ = 0,827 x EM - 0,0058 x MAT + 0,0040 x MG - 0,0044 x CB	2,0	Noblet <i>et al</i> 1989
31	EN ₄₅ = 12,11 - 0,0282 x MM + 0,0197 x MG - 0,0126 x NDF + 0,0033 x Amidon	2,5	Noblet <i>et al</i> 1989

¹ MAD, MGD, CBD, ENAD pour matières azotées digestibles, matières grasses digestibles, cellulose brute digestible et extractif non azoté digestible; ResD= Matière organique digestible - (MAD + MGD + CBD + Amidon).

les teneurs en ED ou en EM et quelques caractéristiques chimiques brutes. La troisième est une tentative pour prédire la teneur en EN directement à partir des caractéristiques chimiques de l'aliment. Ce dernier groupe d'équations n'est pas applicable aux matières premières alors que les deux premiers peuvent être utilisés indifféremment pour les régimes et les matières premières.

Enfin, des mesures de teneur en EN ont été réalisées à l'Université de l'Iowa par Ewan et collaborateurs (de Gøey et Ewan 1975). Les mesures ont porté exclusivement sur des matières premières (environ 20) et ont été réalisées sur des porcelets par la méthode des abattages. La compilation de tous les résultats disponibles a été réalisée par Ewan (1989). Outre le modèle animal dont la physiologie digestive est particulière par rapport au porc en croissance et à la truie, les données de Ewan et collaborateurs ne peuvent s'appliquer qu'aux matières premières étudiées, l'extrapolation à d'autres matières premières et à des régimes étant difficilement envisageable.

3 / Comparaison des systèmes énergétiques

3.1 / ED, EM et EN

La relation concernant les variations de k avec la composition chimique de l'aliment montre clairement que la hiérarchie entre aliments dans le système EM sera modifiée dans le système EN en fonction de leurs caractéristiques chimiques. Ainsi, si l'on estime que la valeur EN représente la "meilleure" estimation de la valeur énergétique d'un aliment, les systèmes EM ou ED surestimeront les aliments riches en matières azotées ou en parois végétales et, inversement, sous-estimeront ceux ayant des teneurs élevées en matières grasses ou en amidon. Ces conclusions sont clairement mises en évidence dans le tableau 6 où les valeurs ED, EM et EN mesurées sur quelques matières premières sont présentées.

Dans les travaux de Noblet *et al* (1989), le rapport EN/ED, en moyenne de 71% pour les 41 régimes de l'étude, variait de 64 à 76%. Les valeurs extrêmes sont obtenues avec des régimes peu utilisés en pratique. Aussi, pour la plupart des régimes, le rapport EN/ED variera entre 68 et 73%. Cet écart est considérablement plus réduit que celui que l'on peut observer pour les matières premières (tableau 6). En définitive, le choix et les avantages du système EN par rapport aux systèmes ED ou EM se justifient beaucoup plus pour les matières premières que pour les régimes. Toutefois, même pour les régimes, il est clair à partir des résultats d'essais zootechniques (non publié) que, pour un ensemble de régimes, l'expression de l'indice de consommation sur la base de l'EN supprime les écarts entre régimes observés sur la base de l'ED. Le système EM a peu d'avantages sur le système ED; il atténue légèrement la surestimation de la valeur énergétique des aliments riches en protéines.

3.2 / Les systèmes EN

Dans le paragraphe précédent, nous avons mis en évidence que la valeur EN d'un aliment est calculée selon différentes équations, chaque équation conduisant alors à un système. Chaque équation est établie dans des conditions expérimentales et avec des méthodologies différentes. Un même aliment peut par conséquent avoir autant de valeurs EN qu'il y a d'équations. La comparaison des systèmes EN est donc primordiale. Dans ce but, les valeurs EN mesurées sur 41 régimes (Noblet *et al* 1989) et sur quelques matières premières (Noblet *et al* 1990, tableau 6) ont été comparées à celles pouvant être calculées avec les équations proposées par Schiemann *et al* (1972) (ENr), Just *et al* (1983) (ENj) et Noblet *et al* (1989) (tableau 5).

Pour les 41 régimes, les valeurs moyennes de ENr et ENj sont respectivement 9,95 et 9,40 MJ/kg de matière sèche, la valeur EN mesurée (ENm) étant égale à 10,60 MJ/kg de matière sèche. L'écart moyen est essentiellement dû à des différences dans l'estimation de la produc-

**Le système EM
a peu
d'avantages
par rapport au
système ED.**

Tableau 6. Valeurs énergétiques mesurées et calculées de quelques matières premières incorporées dans des régimes complexes (à partir de Noblet *et al* 1990)¹.

	ED	EM	EN	ENr	ENj	EN6
Régime, MJ/kg MS ²	16,20	15,73	11,52	10,70	10,54	11,65
En % de teneur en énergie du régime						
Blé	100	100	105	103	101	106
Orge	93	94	100	97	93	98
Manioc	98	99	112	107	99	112
Pois	100	100	96	99	100	96
Tourteau soja	101	97	70	82	97	69
Graisses animales	184	188	254	252	205	237

¹ ED, EM et EN correspondent à des valeurs énergétiques mesurées alors que ENr, ENj et EN6 sont calculées à partir des teneurs en éléments digestibles (équations au tableau 5).

² Régime correspond à la valeur énergétique de la combinaison de 85% de blé et 15% de tourteau de soja.

tion de chaleur au jeûne (voir ci-dessus). Toutefois, pour l'ensemble des régimes, les valeurs ENr ou ENj ne sont pas strictement proportionnelles à la valeur mesurée. L'équation suivante:

$$\text{ENr} = 2,22 + 0,728 \times \text{ENm} \quad (\text{ETR} = 0,24)$$

dans laquelle les teneurs en EN sont exprimées en MJ par kg de matière sèche, indique que, dans le cas de ENr, les régimes à faible concentration en énergie sont surestimés, relativement aux régimes à teneur en énergie élevée. Une analyse plus approfondie des écarts entre ENm et ENr montre que la différence entre les deux estimations s'accroît avec l'augmentation de la teneur en amidon et diminue lorsque la teneur en fibres est accrue. La même démarche appliquée au système ENj met en évidence que la différence entre ENm et ENj est corrélée positivement aux teneurs en amidon et en matières grasses et négativement à la teneur en protéines (Noblet *et al* 1989). Comme on pouvait s'y attendre, les valeurs EN6, EN6b et EN19 (tableau 5) sont comparables en moyenne à ENm, la valeur EN6 tendant cependant à surestimer la valeur EN des régimes à faible concentration énergétique.

Ces observations sont encore illustrées plus clairement au tableau 6 pour quelques matières premières. Ainsi, comparativement aux valeurs mesurées, le système ENr sous-estime la valeur énergétique des aliments riches en amidon et surestime celle des aliments contenant beaucoup de fibres ou de protéines. Ces insuffisances du système ENr avaient déjà été soulignées par Borgrevve *et al* (1975). Le système ENj offre peu d'avantages par rapport au système ED puisque, par exemple, les hiérarchies établies entre matières premières dans les systèmes ED ou EN sont très comparables (tableau 6). Ainsi, il sous-estime les aliments riches en amidon et en matières grasses et surestime ceux qui ont des teneurs élevées en parois végétales. Ces conclusions ne sont pas, a posteriori, très surprenantes puisque, d'une part, dans le système ENr, on attribue au résidu extractif non azoté digestible une valeur EN constante alors qu'il est particulièrement hétérogène; d'autre part, il n'est pas tenu compte de la composition de l'EM dans les équations proposées par Just (1975, 1982) et Just *et al* (1983). Ces résultats sont en accord avec les équations du système proposé par Noblet *et al* (1989) où l'intérêt de la prise en compte de la teneur en amidon de l'aliment pour la prédiction de la valeur EN est clairement mis en évidence.

3.3 / Conséquences pratiques

Les paragraphes précédents ont clairement montré que la hiérarchie entre aliments est variable selon le système énergétique adopté, les écarts les plus importants étant observés pour les matières premières. Les résultats obtenus en formulation au moindre coût seront donc fonction du système énergétique adopté. Ceci est clairement démontré dans le cas des matières premières riches en protéines pour

lesquelles la valeur ED surestime la valeur énergétique "vraie". En conséquence, pour une même série de matières disponibles, la formulation au moindre coût basée sur la valeur EN conduit à des régimes ayant des teneurs en matières azotées plus faibles que sur la base de la valeur ED. A l'inverse, le système EN conduit à des taux d'introduction de matières grasses plus élevées. Les divergences entre systèmes EN induisent également des différences au niveau des matières premières introduites et de la composition chimique des régimes. Ainsi, comparativement au système EN de Noblet *et al* (1989), le système ENr conduit à introduire moins de matières premières riches en amidon (céréales) et plus de sous produits riches en parois végétales et/ou en matières azotées. Les conséquences du choix du système énergétique sur les résultats de la formulation ont été plus longuement abordés par Noblet (1990).

La validité d'un système énergétique peut être appréciée de différentes façons, la plus probante étant la réponse des animaux mesurée au cours d'essais zootechniques. Dans ce but, huit régimes ont été distribués à 540 porcs alimentés individuellement et répartis dans six sites expérimentaux. Les valeurs EN selon les différents systèmes ont été calculées à partir des teneurs mesurées en ED, EM et en éléments digestibles de ces 8 régimes. Les résultats (non publiés) confirment la supériorité du concept EN sur les concepts ED ou EM pour la prédiction des performances (par exemple, indice de consommation à composition corporelle constante) du porc. Ils confirment, tout comme les travaux de Borgrevve *et al* (1975), le biais introduit par le système ENr pour les aliments riches en amidon et la non supériorité du système ENj sur le système ED. Les équations EN6, EN19, ... permettent une prédiction satisfaisante des performances des animaux. La validité des équations proposées par Noblet *et al* (1989) se vérifie également lors de leur application au cas particulier des matières premières, la valeur calculée étant alors proche de la valeur mesurée (Noblet *et al* 1990, tableau 6). Ces équations se sont enfin trouvées vérifiées lors de la comparaison de valeurs EN mesurées sur de nouveaux régimes et des valeurs calculées à partir des équations EN6, EN19, ... (non publié).

L'intérêt du concept EN pour l'estimation de la valeur énergétique des aliments chez le porc, comparativement aux concepts ED ou EM, est relativement évident, surtout pour les matières premières. Les questions d'ordre pratique sont alors : quel système doit-on choisir et comment peut s'estimer la valeur énergétique ? Le système proposé par Noblet *et al* (1989) présente des avantages sur les systèmes ENr et ENj (teneur en amidon, ...) et il permet une meilleure discrimination des valeurs énergétiques des aliments. Sa mise en place peut s'adapter à tous les systèmes existants (tables de valeurs ED, EM, de teneurs en éléments digestibles, ...). Ainsi, l'équation EN6 (ou EN6b) basée sur les teneurs en amidon, matières azotées digestibles, matières grasses digestibles, cellulose brute digestible et "résidu

Il est important de prendre en compte la teneur en amidon de l'aliment pour prédire sa valeur EN.

digestible" s'applique aux données disponibles dans les tables CVB (1988) ou DLG (1984). L'équation EN19 peut être utilisée immédiatement à partir d'un système ED (INRA, 1989). Cette approche est autant valable pour les matières premières que pour les régimes dont on connaît la composition centésimale. Dans ce dernier cas, la teneur en EN se calcule à partir des sommes d'éléments digestibles apportés par les matières premières (EN6, EN6b) ou de la teneur en ED additive et des caractéristiques chimiques du régime (EN19) ou par simple addition des valeurs EN des matières premières.

Dans le cas particulier des régimes dont la composition centésimale et les caractéristiques des matières premières utilisées ne sont pas connues, le seul recours est actuellement, comme pour l'ED ou l'EM, l'utilisation de relations mettant directement en relation la valeur EN et la composition chimique de l'aliment. Quelques relations ont été proposées par Noblet *et al* (1989) (tableau 5). Il faut insister sur le fait que de telles relations ne sont applicables qu'aux régimes, la précision du résultat étant, comme pour l'ED ou l'EM, limitée par l'origine des matières premières (nature des parois végétales, des matières grasses, ...) et la qualité des analyses de laboratoire. Elles permettent toutefois une discrimination rapide de régimes dont seules les caractéristiques de composition chimique sont disponibles. Dans le cas des matières premières, elles peuvent créer des distorsions dues au fait que, par exemple, les parois végétales ou les matières grasses ont une digestibilité très différente de celle mesurée en moyenne sur un grand nombre de régimes.

Conclusions et perspectives

Les résultats présentés dans cette synthèse mettent clairement en évidence les difficultés et les limites de tous les modes d'évaluation de la teneur en énergie des aliments pour le porc. On doit cependant accorder une préférence aux systèmes EN, le système proposé par Noblet *et al* (1989) étant en mesure de discriminer plus précisément les aliments en fonction de leurs caractéristiques chimiques; il offre différentes possibilités pour le passage d'un système ED ou EM au système EN proposé et il a été validé par des essais zootechniques. De plus, ce système établi dans le cas du porc en croissance sera prochainement révisé en fonction d'observations nouvelles. Il sera également étendu aux autres situations physiologiques rencontrées en production porcine, à savoir les animaux utilisant une part élevée de l'apport énergétique pour la couverture de leurs dépenses d'entretien (Noblet *et al* 1993b) ou ceux dont la composition chimique du gain (rapport protéines : lipides) varie avec notamment le poids vif ou le type génétique (Noblet *et al* 1993c).

L'article a également mis en évidence que la digestibilité de l'énergie d'un aliment est non seulement fonction de ses caractéristiques chi-

miques mais également de l'animal auquel l'aliment est distribué. Les effets du poids vif des porcs, du niveau d'alimentation et du degré de complexité du régime sont apparus comme quantitativement importants. En conséquence, une attention particulière devra être accordée à cet aspect de la détermination de la valeur énergétique des aliments chez le porc. En d'autres termes, tout système, quel que soit son degré de sophistication, sera incapable de prédire avec précision la valeur d'un aliment si la digestibilité de l'énergie et des nutriments est incorrecte.

Enfin, l'industrie de l'alimentation animale ou, de façon plus générale, les différents partenaires de la production porcine, requièrent des méthodes permettant de prédire précisément et rapidement la valeur nutritionnelle des aliments. L'utilisation des tables de valeur nutritionnelle ou d'équations faisant appel aux caractéristiques de composition chimique est souvent insuffisante. Les progrès dans ce domaine viendront essentiellement de propositions concernant les méthodes basées sur des techniques *in vitro* ou physico-chimiques.

Texte présenté en Novembre 1992 lors d'une session du Cours Approfondi d'Alimentation Animale et préparé à partir d'une revue présentée lors de la réunion bisannuelle de l'Australasian Pig Science Association (Décembre 1991).

Références bibliographiques

- Batterham, E.S., Lewis, C.E., Lowe, R.F., McMillan, C.J., 1980a. Digestible energy content of cereals and wheat by-products for growing pigs. *Anim. Prod.*, 31:259-271.
- Batterham, E.S., Lewis, C.E., Lowe, R.F., McMillan, C.J., 1980b. Digestible energy content of meat meals and meat and bone meals for growing pigs. *Anim. Prod.*, 31:273-277.
- Bourdon, D., 1986. Valeur nutritive des nouveaux tourteaux et graines entières de colza à basse teneur en glucosinolates pour le porc à l'engrais. *Journées Rech. Porcine en France*, 18:91-102.
- Carré, B., Prévotel, B., Leclercq, B., 1984. Cell wall content as a predictor of metabolizable energy value of poultry feedingstuffs. *Br. Poult. Sci.*, 25: 561-572.
- Chabeauti, E., Noblet, J., Carré, B., 1991. Digestion of plant cell walls from four different sources in growing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 32, 207-213.
- CVB (Cental Veevøderbureau), 1986. Veevødertabel. Gegevens over vøderwarde, verteerbaarheid en samenstelling. CVB: Lelystad.
- De Gøey, L.W., Ewan, R.C., 1975. Energy values of corn and oats for young swine. *J. Anim. Sci.*, 40:1052-1057.
- DLG, 1984. Futterwerttabellen für Schweine. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 82 pp.

- Everts, H., Smits, B., Jongbloed, A.W., 1986. Effect of crude fibre, feeding level and body weight on apparent digestibility of compound feeds by swine. *Neth. J. Agric. Sci.*, 34, 501-503.
- Ewan, R.C., 1989. Predicting the energy utilization of diets and feed ingredients by pigs. In: Y. van der Honing and W.H. Close (Editors), *Energy Metabolism of Farm Animals*, Pudoc, Wageningen, pp. 215-218.
- INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles. INRA éd., Paris, 282 p.
- Just, A., 1982. The net energy value of balanced diets for growing pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 8:541-555.
- Morgan, C.A., Whittemore, C.T., Phillips, P., Crooks, P., 1987. The prediction of the energy value of compounded pig foods from chemical analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 17:81-107.
- Noblet, J., Fortune, H., Dubois, S., Henry, Y., 1989. Nouvelles bases d'estimation des teneurs en énergie digestible, métabolisable et nette des aliments pour le porc, INRA éd., Paris, 106 p.
- Noblet, J., Fortune, H., Dupire, C., Dubois, S., 1990. Valeur nutritionnelle de treize matières premières pour le porc en croissance. 1. Teneurs en énergie digestible, métabolisable et nette. Conséquences du choix du système énergétique. *Journées Rech. Porcine en France*, 22, 175-184.
- Noblet, J., Henry, Y., 1991. Energy evaluation systems for pig diets. In: E.S. Batterham (Editor), *Manipulating Pig Production III*. Australasian Pig Science Association, Attwood, pp. 87-110.
- Noblet, J., Karege, C., Dubois, S., 1991. Influence of growth potential on energy requirements for maintenance in growing pigs. In C. Wenk and M. Bössinger (Editors), *Energy Metabolism of Farm Animals*, ETH, Zurich, pp. 107-110.
- Noblet, J., Shi, X.S., 1993. Comparative digestibility of energy and nutrients in growing pigs fed ad libitum and adult sows fed at maintenance. *Livest. Prod. Sci.* 34, 137-152.
- Noblet, J., Shi, X.S., Karege, C., Dubois, S., 1993a. Effets du type sexuel, du niveau d'alimentation, du poids vif et du stade physiologique sur l'utilisation digestive de l'énergie et des nutriments chez le porc; interactions avec la composition du régime. *Journées Rech. Porcine en France*, 25, 97-112.
- Noblet, J., Shi, X.S., Dubois, S., 1993b. Metabolic utilization of dietary energy and nutrients for maintenance energy requirements in sows: basis for a net energy system. *Br. J. Nutr.* (in press).
- Perez, J.M., Ramihone, R., Henry, Y., 1984. Prédiction de la valeur énergétique des aliments composés destinés au porc: étude expérimentale. INRA éd., Paris, 95 pp.
- Perez, J.M., Bourdon, D., Baudet, J.J., Evrard, J., 1986. Prédiction de la valeur énergétique des tourteaux de tournesol à partir de leurs teneurs en constituants pariétaux. *Journées. Rech. Porcine en France.*, 18:35-42.
- Perez, J.M., 1990. Prévion de l'énergie digestible des aliments pour le porc: intérêt du dosage des parois végétales par voie enzymatique. *INRA Prod. Anim.*, 3:171-179.
- Roth, F.X., Kirchgessner, M., 1984. Verdaulichkeit der Energie und Rohnährstoffe beim Schwein in Abhängigkeit von Fütterungs niveau und Lebendgewicht. *Z. Tierphysiol. Tierernähr. u. Futtermittelkunde*, 51, 79-87.
- Schiemann, R., Nehring, K., Hoffmann, L., Jentsch, W., Chudy, A., 1972. Energetische Futterbeverung und Energienormen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 344 pp.
- Shi, X.S., Noblet, J., 1993. Digestible and metabolizable energy values of ten ingredients in growing pigs fed ad libitum and sows fed at maintenance level; comparative contribution of the hindgut. *Anim. Feed Sci. Technol.* (in press).
- Wiseman, J., Cole, D.J.A., 1980. Energy evaluation of cereals for pig diets. In: W. Haresign (Editor), *Recent Advances in Animal Nutrition*. Butterworths, London, pp. 51-67.

Summary

Energy evaluation systems for pig diets.

Different energy values can be attributed to a given feed according, firstly, to the considered step of energy utilization by the pig (digestible (DE), metabolizable (ME) or net (NE) energy) and, secondly, to the prediction method used for each step. The aspects developed in the first part of this review relate to the effects of chemical composition of the diet and animal factors such as age or body weight on digestive and metabolic utilization of energy. In a second part, the available DE, ME

and NE systems when applied to diets or ingredients are presented. In the third part, the different energy systems are compared in terms of advantages, limits and applicability for each of them. The comparison indicates that the hierarchy between diets and, more clearly, between ingredients and, consequently, results of least-cost formulation are dependent on the energy system.

Noblet J., 1993. Les systèmes d'appréciation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. *INRA Prod. Anim.*, 6 (2), 105-115.