

# TENEUR EN ÉNERGIE NETTE DES ALIMENTS CHEZ LE PORC

## Mesure, prédiction et validation aux différents stades de sa vie.

J. NOBLET (1), X.S. SHI (1), H. FORTUNE (1\*), S. DUBOIS (1), Y. LECHEVESTRIER (2), C. CORNIAUX (1\*\*),  
D. SAUVANT (2), Y. HENRY (1)

(1) I.N.R.A. - Station de Recherches Porcines, 35590 Saint Gilles.

(2) I.N.A. - P.G., Département des Sciences Animales, 16 rue Claude-Bernard, 75231 Paris Cédex 05.

avec la collaboration de SYLVIANE BARRE, G. CONSEIL, H. DEMAY, Y. LEBRETON, NADINE MÉZIERE, J.C. RISSEL et A. ROGER pour les mesures réalisées à l'I.N.R.A., des partenaires du G.E.R.N.A. pour la conception des essais zootechniques de validation, des responsables et techniciens des stations expérimentales de l'A.G.P.M. (Montardon), GUYOMARC'H Nutrition Animale (Vannes), l'I.T.C.F. (Villérable), l'U.C.A.A.B. (Château-Thierry) et l'U.F.A.C. (Vigny) pour la réalisation des essais zootechniques de validation, des responsables et techniciens de la Station SANDERS de Sourches pour les mesures de digestibilité sur les 8 régimes utilisés dans les essais de validation et des responsables et techniciens de la Station I.T.C.F. de Boigneville pour la fabrication des aliments utilisés lors des essais de validation.

Afin de mettre au point un système d'appréciation de la valeur énergétique nette des aliments chez le porc, les teneurs en éléments digestibles, énergie digestible (ED), énergie métabolisable (EM) et énergie nette (EN) de 61 régimes ont été mesurées chez des porcs en croissance (45 kg) (essai 1). La validité des équations obtenues pour la prédiction de l'EN a été testée, d'une part, par la mesure de la valeur EN d'une même série de régimes à différents stades de la vie du porc (7 régimes chez des porcs de 45, 100 et 150 kg: essai 2; 14 régimes chez des porcs de 45 kg et des truies adultes à l'entretien: essai 3) et, d'autre part, par des expériences en lots portant sur 520 porcs élevés dans 6 sites différents et recevant 8 régimes (essai 4). Le rapport EN/EM correspond au rendement d'utilisation de l'EM pour la croissance ( $k_g$ ) ou pour l'entretien ( $k_m$ ). En premier lieu, la valeur de  $k_g$  n'est pas influencée par le poids vif, chez l'animal en croissance. Comme les rendements d'utilisation de l'EM des éléments digestibles diffèrent selon leur nature (58, 90, 82 et 58% respectivement, pour les matières azotées digestibles (MAD), les matières grasses digestibles (MGD), l'amidon et les parois végétales digestibles chez le porc en croissance), les valeurs de  $k_g$  et  $k_m$  (respectivement 74 et 77%, en moyenne) dépendent de la composition chimique de l'aliment. La légère supériorité de  $k_m$  sur  $k_g$  concerne avant tout les MAD et les MGD; toutefois, la hiérarchie entre aliments établie sur les valeurs EN pour la croissance est conservée avec les valeurs EN pour l'entretien. Il en résulte que la prédiction de la teneur en EN des aliments du porc sur la base de leurs teneurs en éléments digestibles ou en ED peut s'effectuer à partir d'une même équation, applicable à tous les stades de sa vie. Les équations proposées sont utilisables à partir des données disponibles dans les tables de valeur nutritionnelle. Les résultats mettent également en évidence les avantages du concept EN sur les concepts ED et EM pour estimer la valeur énergétique des aliments et prédire les performances des animaux. Ils font également ressortir la nécessité de poursuivre des études de digestibilité, s'attachant notamment à l'étude des interactions entre la composition chimique de l'aliment et l'animal (stade de croissance, stade physiologique).

### Net energy content of pig feeds: measurement, prediction and validation at all stages of pig production.

In order to propose a net energy system for pig feeds, digestible nutrient contents and digestible (DE), metabolizable (ME) and net (NE) energy contents of 61 diets were measured in growing pigs (45 kg) (trial 1). The validity of NE prediction equations has been tested, firstly, by measuring NE content of the same diets at different stages of pig production (7 diets in 45, 100 and 150 kg pigs: trial 2; 14 diets in 45 kg growing pigs and maintenance fed adult sows: trial 3) and secondly, in a growth experiment including 520 pigs kept in 6 different locations and fed 8 diets (trial 4). The NE/ME ratio is considered as the efficiency of ME for net energy in growing animals ( $k_g$ ) or for maintenance ( $k_m$ ). The results show that  $k_g$  was not affected by body weight over the growing period. Since the efficiencies of ME utilization differed between digestible nutrients (58, 90, 82 and 58% for digestible crude protein (DCP), digestible ether extract (DEE), starch and digestible cell wall fractions, respectively),  $k_g$  and  $k_m$  (74 and 77%, on average) vary according to chemical composition of feeds. The higher value obtained for  $k_m$  is due to higher efficiencies of DCP and DEE for meeting maintenance requirements; however, the hierarchy between diets is the same when it is based on NE values for growth or NE values for maintenance. Therefore, the prediction of NE in pig feeds from their digestible nutrient or DE contents can be achieved by a single equation at all stages of pig production. The proposed equations take into account the available information in feeding tables. The results also show the advantages of NE (in comparison with DE or ME) for estimating the energy value of feeds and for predicting growth performance of pigs. They confirm the importance of digestibility experiments, especially by considering the interactions between diet characteristics and animal factors (stage of growth, physiological stage).

(\*) Adresse actuelle : UNICOPA - Nutrition Animale, B.P. 12, 56440 Languidic

(\*\*) Adresse actuelle : I.E.M.V.T. - 10 rue Pierre Curie, 94704 Maisons-Alfort Cédex

## INTRODUCTION

L'alimentation continue de représenter plus de 50% des coûts en production porcine, l'énergie en constituant, dans la plupart des conjonctures technico-économiques, la composante principale. Il est par conséquent important d'évaluer précisément la teneur en énergie des aliments afin de les hiérarchiser et d'adapter les apports aux besoins en énergie des animaux. En pratique, la valeur énergétique d'un aliment est exprimée en termes d'énergie digestible (ED), métabolisable (EM) ou nette (EN) avec, pour chacune de ces trois étapes, des modes de prévision (ou systèmes) différents. Les facteurs de variation de l'utilisation de l'énergie aux trois niveaux considérés et les principaux systèmes énergétiques qui en résultent ont été analysés par NOBLET et HENRY (1993) et NOBLET (1993).

Pour ce qui concerne la prédiction de la teneur en EN des aliments du porc, trois systèmes énergétiques principaux issus de trois études différentes sont disponibles (SCHIEMANN et al., 1972; JUST, 1982; NOBLET et al., 1989). Comme chacun d'eux a été mis au point dans des conditions expérimentales et avec des approches méthodologiques très différentes, leur comparaison est délicate et les résultats n'autorisent, en aucune façon, l'analyse des effets de facteurs, comme le poids vif ou la nature de l'énergie fixée, sur l'utilisation métabolique de l'énergie. De plus, l'application de chaque système est en principe limitée à des situations pratiques (poids vif, niveau d'alimentation, type génétique, ...) qui prévalaient lors de son établissement. C'est pourquoi, la mise en oeuvre d'un système énergétique basé sur la valeur EN n'est théoriquement possible que si l'on a pris soin, d'une part, de vérifier l'applicabilité du système EN, mis au point dans une situation bien définie, aux autres conditions expérimentales de la vie du porc et, d'autre part, de valider le système proposé par la mesure des performances des animaux lors d'essais en lots. Une telle démarche n'a pas été conduite dans les travaux de SCHIEMANN et al. (1972) ou de JUST (1982).

Les équations de prédiction de la valeur EN des aliments proposées par NOBLET et al. (1989) sont basées sur des mesures réalisées avec des porcs de 45-50 kg déposant environ 35% de leur énergie sous forme de protéines. Mais, cette proportion varie très fortement au cours de la croissance pour s'abaisser, par exemple, à une valeur voisine de 20% au stade habituel d'abattage. Par ailleurs, selon le type de porc (porc en croissance, truie gravide, truie allaitante, ...), une part variable de l'EM est utilisée pour la couverture des besoins d'entretien. Or, les résultats obtenus chez le porc ou avec d'autres espèces animales montrent clairement que les rendements d'utilisation de l'EM sont très différents selon que celle-ci est utilisée pour le dépôt de protéines ou de lipides, pour la production de lait ou pour la couverture des dépenses d'entretien. On peut par conséquent s'attendre à des différences de valeur EN d'un même aliment selon l'utilisation réelle de l'énergie alimentaire.

Dans ce but et en complément des travaux de NOBLET et al. (1989), trois essais ont été conduits de façon à 1/ analyser l'influence de la composition chimique de l'aliment sur le rendement d'utilisation de l'EM ( $k_g$ ) chez le porc de 45 kg (essai 1), 2/ préciser les variations de  $k_g$  avec la nature de l'énergie fixée (ratio protéines: lipides) (essai 2) et 3/ comparer, pour une même série de régimes, les valeurs de  $k_g$  aux rendements d'utilisation de l'EM pour l'entretien ( $k_m$ ) chez la truie adulte (essai 3). Par ailleurs, les capacités des systèmes ED, EM et EN à prédire les performances du porc en crois-

sance ont été comparées lors d'essais zootechniques conduits sur environ 520 porcs (essai 4). Cette synthèse a pour objet de rassembler les principaux résultats de cet ensemble de travaux et de proposer et analyser des méthodes d'estimation de la valeur énergétique nette des aliments du porc qui soient valables aux différents stades de sa vie. Les résultats des essais 1, 2 et 3 ont fait l'objet respectivement de présentations plus détaillées par NOBLET et al. (1994a, 1994b et 1993c).

## 1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1.1. Essais 1, 2 et 3

#### 1.1.1. Dispositifs expérimentaux.

Dans l'essai 1, 61 régimes expérimentaux dont les 41 de l'étude de NOBLET et al. (1989) ont été distribués à des porcs en croissance (mâles entiers Large White ou mâles castrés Large White x Piétrain) pesant en moyenne 43 kg au moment des mesures. Les régimes ont été fabriqués à partir de 25 matières premières différentes et ont des caractéristiques chimiques susceptibles de couvrir toutes les situations pratiques (tableau 1). Chaque régime est apporté à au moins 4 porcs pendant environ 21 jours dont 10 pour l'adaptation au régime et à la cage de digestibilité et 10-11 pour la collecte des fèces et de l'urine. La cage de digestibilité est introduite dans la chambre respiratoire pendant les 7 derniers jours de la période de collecte pour la mesure de la production quotidienne de chaleur et de méthane. Le niveau d'alimentation est progressivement accru pendant la période d'adaptation pour atteindre en moyenne 2,30 MJ d'EM par kg PV<sup>0,60</sup> et par jour (niveau haut) avant le début de la collecte. Ce niveau d'alimentation est ajusté quotidiennement. Au cours des 5ème et 6ème jours dans la chambre respiratoire, il est réduit d'environ 40% (en moyenne 1,38 MJ EM par kg PV<sup>0,60</sup>; niveau bas). Les porcs sont élevés à 22 et 24°C, aux niveaux d'alimentation respectivement haut et bas.

Pour la réalisation de l'essai 2, 7 des 61 régimes de l'essai 1 (stade 1) sont mesurés sur des porcs de 100 (stade 2) et 150 kg (stade 3). Les régimes sont préparés à partir d'un régime de base auquel on ajoute de l'amidon de maïs ou du saccharose ou de l'huile de colza ou une source de protéines ou un mélange de matières premières riches en parois végétales (tableau 7). La valeur nutritionnelle des matières premières ajoutées est calculée à l'aide de la méthode par différence. Chaque régime est distribué pendant environ 21 jours à 4 animaux pour chacun des 3 stades de croissance (7 mesures pour le régime de base), les 10 premiers jours étant considérés comme une séquence d'adaptation à l'aliment et à la contention en cage de digestibilité. Aux stades 2 et 3, chaque porc est utilisé pendant deux périodes successives de 21 jours (P1 et P2) avec deux régimes différents, alors qu'au stade 1 chaque porc ne reçoit qu'un régime. Conformément à ce qui est décrit ci-dessus pour l'essai 1, la collecte des excréta dure 10 à 11 jours pour les porcs du stade 1, l'animal étant placé dans la chambre respiratoire les 7 derniers jours (dont 2 jours à un niveau d'alimentation bas). Aux stades 2 et 3, les excréta sont collectés pendant 9 jours consécutifs à un niveau d'alimentation élevé, la collecte étant effectuée pendant les 5 derniers jours sur l'animal placé dans la chambre respiratoire. Le porc est maintenu pendant deux jours supplémentaires dans la chambre respiratoire pour la mesure de sa production de chaleur, soit à un niveau d'alimentation bas représentant 60% du niveau haut (P1), soit à jeûn (P2). Le niveau d'alimentation

haut, pour les 3 stades de l'essai, est proche du niveau à volonté; les consommations des différents régimes (EM par kg PV<sup>0,60</sup>) sont toutefois ajustées sur celle du régime le plus riche en fibres. Les quantités effectivement consommées sont

en moyenne de 2,30, 2,13 et 1,92 MJ d'EM par kg PV<sup>0,60</sup> respectivement aux stades 1, 2 et 3. La température dans la chambre respiratoire est fixée à 22 et 24°C respectivement pour les niveaux d'alimentation haut et bas (ou à jeûn).

**Tableau 1** - Composition chimique, éléments digestibles et utilisation de l'énergie de 61 régimes chez le porc en croissance (essai 1).

Item	Moyenne	Minimum	Maximum
<b>Composition chimique, g/kg MS</b>			
Matières minérales	74	49	108
Matières azotées	198	110	274
Matières grasses	45	12	112
Cellulose brute	55	10	108
NDF	151	44	261
ADF	67	16	128
ADL	12	4	32
Amidon	428	230	636
Sucres	59	17	282
WICW (1)	171	45	281
Énergie brute, MJ/kg MS	18,36	17,33	19,90
<b>Poids vif, kg</b>	43,1	38,2	46,7
<b>MS ingérée, g/j</b>	1532	1310	1788
<b>Éléments digestibles, g/kg MS</b>			
Matière organique	767	619	896
Matières azotées (MAD)	157	79	243
Matières grasses (MGD)	27	3	86
Cellulose brute (CBD)	20	2	51
Extractif non-azoté (ENAD)	564	371	717
NDF	70	19	124
ADF	25	6	63
NDF-ADF	45	13	86
ADF-ADL	23	2	62
<b>CUD énergie, %</b>			
Énergie du méthane, % de ED	0,41	0,06	1,24
Énergie de l'urine, % de ED	3,43	2,06	5,53
<b>Utilisation métabolique de l'énergie, %</b>			
EN/EM	73,9	69,0	77,2
EN/ED	71,0	65,3	75,4
<b>Valeur énergétique des régimes, MJ/kg MS</b>			
ED	14,76	11,96	17,21
ED iléal (EDi)	12,89	9,58	16,41
ED gros intestin (EDh)	1,87	0,50	3,60
EM	14,19	11,54	16,68
EN	10,50	8,23	12,79
ENs (1)	9,89	8,18	12,00
ENj (1)	8,76	6,77	10,63
ENnl (1)	10,12	8,21	12,28

(1) WICW: Water insoluble cell walls (selon CARRE et BRILLOUET, 1989); ENs =  $0,0109 \times \text{MAD} + 0,0361 \times \text{MGD} + 0,0090 \times \text{CBD} + 0,0125 \times \text{ENAD}$  (SCHIEHMANN et al., 1972); ENj =  $0,75 \times \text{EM} - 1,88$  (JUST, 1982); ENnl =  $0,0108 \times \text{MAD} + 0,0361 \times \text{MGD} + 0,0135 \times \text{Amidon} + 0,0127 \times \text{Sucres} + 0,0095 \times \text{ResD}$  (IVVO, 1993; communication personnelle).

Dans l'essai 3, 14 des 61 régimes de l'essai 1 sont mesurés sur six truies Large White d'un poids vif moyen de 208 kg. Chaque

truie reçoit successivement 8 à 10 des 14 régimes. Chacun des régimes est distribué pendant environ 28 jours, les 17 premiers

jours pour l'adaptation à l'aliment et les 8 jours suivants pour la collecte totale des fèces et de l'urine, l'animal étant alors maintenu dans une chambre respiratoire pour la mesure de la production quotidienne de chaleur et de méthane. Pendant la période d'adaptation et les 5 premiers jours de collecte en chambre respiratoire, le niveau alimentaire permet de couvrir les dépenses énergétiques d'entretien ( $400 \text{ kJ d'EM/kg PV}^{0,75}$ ). L'apport d'aliment est alors réduit à 60% du besoin d'entretien pendant 2 jours, puis augmenté le jour suivant (120% du besoin d'entretien). Enfin, au cours des 3 derniers jours, des mesures de production de chaleur au jeûne sont réalisées (NOBLET et al., 1993c). Des ajustements du niveau d'alimentation sont effectués périodiquement pour chaque truie de façon à maintenir son poids vif et son état corporel (épaisseur de lard dorsal) constants au cours des 9 mois de l'étude. La température dans la chambre respiratoire est maintenue à  $24^\circ\text{C}$  pendant toute la durée de l'étude.

La digestibilité iléale de l'énergie et des nutriments des 61 régimes a été mesurée chez des porcs de 35 à 50 kg disposant d'une anastomose iléo-rectale. Les méthodes utilisées ont été décrites par NOBLET et al. (1989) et SHI et NOBLET (1993 a).

### 1.1.2. Mesures.

Dans les 3 essais, les animaux sont pesés au début et à la fin de la période de collecte des excréta. La mesure des quantités d'aliment ingéré, de fèces et d'urine et la préparation des échantillons pour les analyses de laboratoire sont réalisées conformément aux techniques décrites par NOBLET et al. (1989). La consommation d'oxygène et les productions de gaz carbonique et de méthane sont mesurées quotidiennement dans des chambres respiratoires de type circuit-ouvert (NOBLET et al., 1989). La durée quotidienne de la station debout de chaque animal pendant le séjour en chambre respiratoire est également appréciée à partir de barrières infrarouges placées de part et d'autre de la cage.

Dans le cas particulier des truies de l'essai 3, les échanges respiratoires et la durée de la station debout sont mesurés en continu par intervalles de 7 minutes. Ainsi, de la production de chaleur totale, on soustrait le coût énergétique de l'activité physique de l'animal dont la variabilité est accrue dans la présente expérience par le faible niveau alimentaire. Des détails sur la méthode de calcul sont rapportés par NOBLET et al. (1993d).

### 1.1.3. Analyses chimiques.

Chaque échantillon d'aliment a été analysé par au moins 4 laboratoires pour ses teneurs en matières minérales, matières azotées ( $\text{N} \times 6,25$ ), matières grasses, cellulose brute, NDF, ADF, ADL, WICW, amidon, sucres et énergie brute. Les mêmes analyses sont réalisées sur chaque échantillon de fèces par un seul laboratoire; toutefois, les teneurs en amidon, sucres et WICW ne sont pas mesurées. Seules les teneurs en azote et en énergie brute sont déterminées sur les urines. Les méthodes utilisées sont celles décrites par NOBLET et al. (1989).

### 1.1.4. Calculs et analyses statistiques.

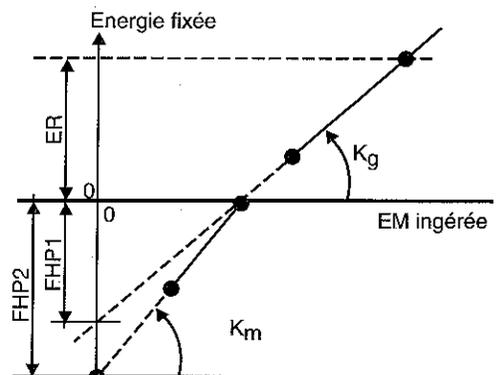
Les teneurs en ED, EM et éléments digestibles de chaque régime sont calculées selon les procédures habituelles (NOBLET et al., 1989). Les valeurs EM prennent en compte les pertes d'énergie sous forme de méthane. Dans les 3 essais, il

a été supposé que l'amidon et les sucres sont totalement digérés par le porc à la fin du tube digestif. La quantité de nutriments et d'énergie absorbés dans le gros intestin correspond à la différence entre les résultats de digestibilité fécale et ceux de digestibilité iléale. Dans les essais 2 et 3, il a été supposé que la digestibilité iléale, mesurée pour chaque régime chez des porcs de 35 à 50 kg, est la même chez des porcs en croissance plus lourds (essai 2) ou des truies adultes (essai 3).

La quantité d'EN consommée par l'animal en croissance correspond à la somme de l'énergie fixée et de la production de chaleur au jeûne (FHP) (figure 1). L'énergie fixée est calculée par différence entre l'EM ingérée au niveau alimentaire haut et la production de chaleur correspondante. A l'exception des truies de l'essai 3, FHP n'a pas été mesurée directement mais estimée par régression entre la production de chaleur et l'EM ingérée pour l'ensemble des animaux soumis aux niveaux alimentaires haut et bas; FHP est alors équivalente à l'ordonnée à l'origine de la relation (ou production de chaleur pour EM ingérée nulle). Des informations plus détaillées sur la méthode de calcul de la valeur EN des aliments pour la croissance ( $\text{EN}_g$ ) ont été données par NOBLET et al. (1989; 1994a et 1994b). Les valeurs retenues pour FHP sont  $0,75 \text{ MJ par kg PV}^{0,60}$  et  $1,50 \text{ MJ par kg PV}^{0,42}$ , respectivement pour les porcs des essais 1 et 2; les deux estimations sont comparables pour des animaux pesant 45 kg.

Dans l'essai 3 où les truies sont alimentées au niveau et au dessous de l'entretien, la valeur EN correspond à la quantité d'EM diminuée de l'extra-chaleur associée à l'utilisation métabolique de l'EM; l'extra-chaleur est égale à la différence entre la production de chaleur au niveau d'alimentation haut (corrigée pour un niveau d'activité physique nulle) et FHP (figure 1). FHP est estimée pour chaque truie à partir de la relation entre la production de chaleur et l'EM ingérée, les deux valeurs étant corrigées pour un niveau d'activité physique nulle (soit 16 à 20 données par truie issues de mesures sur 8 à 10 régimes à 2 niveaux d'alimentation). La méthode de calcul de la valeur EN pour l'entretien ( $\text{EN}_m$ ) chez la truie est décrite de façon plus détaillée par NOBLET et al. (1993c).

**Figure 1** - Méthodes d'évaluation de la teneur en énergie nette des aliments chez le porc. (FHP1 et FHP2 correspondent respectivement à l'estimation de la production de chaleur au jeûne chez le porc en croissance et chez la truie et  $k_g$  et  $k_m$ , aux rendements d'utilisation de l'EM pour la croissance et pour l'entretien.)



Le rapport  $\text{EN/EM} (\times 100; k)$  est défini comme le rendement de transformation de l'EM en EN ( $k_g$  et  $k_m$ , respectivement pour  $\text{EN}_g$  et  $\text{EN}_m$ ).

Les données de l'essai 1 (n=61) ont donné lieu essentiellement à des calculs de régression linéaire multiple de façon à calculer les rendements d'utilisation de l'EM des éléments digestibles et à établir des équations de prédiction de la teneur en EN des aliments chez le porc en croissance. Des calculs similaires ont été effectués sur les données obtenues avec les truies à l'entretien. L'influence du stade de croissance (essai 2) ou du stade physiologique (essai 3) sur l'utilisation métabolique de l'EM a été quantifiée par analyse de variance ou covariance; celle-ci est effectuée sur les données de tous les animaux pour les mesures de digestibilité et de teneur en EM, et uniquement sur les données moyennes de chaque régime pour les résultats se rapportant à l'utilisation métabolique de l'EM. Enfin, les données des 3 essais (n=89) ont été soumises à des analyses de covariance afin de quantifier les effets du stade de croissance et/ou du stade physiologique sur la prédiction de la valeur EN des aliments du porc.

Le logiciel SAS (1988) a été utilisé pour l'ensemble des analyses statistiques se rapportant à l'estimation de FHP (régressions linéaires et non linéaires) et l'utilisation de l'énergie des aliments (régressions, analyses de variance et covariance).

## 1.2. Essai 4: validation des systèmes énergétiques.

### 1.2.1. Dispositif expérimental

L'objectif principal de cet essai est de comparer différents modes d'estimation de la valeur énergétique des aliments (ou systèmes énergétiques) sur la base de leur capacité à prévoir les performances du porc en croissance. La validité ou la «qualité» d'un système énergétique sont alors appréciables de deux façons, suivant que l'on considère, pour un ensemble de régimes diversifiés, la précision de la relation entre l'apport d'énergie et la réponse du porc ou le degré de faible variabilité de l'efficacité alimentaire, exprimée en gain pondéral (ajusté pour une même composition tissulaire ou chimique) par unité d'énergie fournie à l'animal. Dans un «bon» système, l'efficacité alimentaire doit être constante, quelle que soit la composition de l'aliment. Les systèmes que nous avons comparés sont l'ED, l'EM et les systèmes EN établis par SCHIEMANN et al. (1972), JUST (1982) et NOBLET et al. (1989) modifié par les résultats de la présente communication.

Dans ce but, 8 régimes, dont les compositions sont rapportées au tableau 2, ont été distribués entre 27 et 103 kg de poids vif à 520 porcs situés dans 5 lieux différents. Pour 4 lieux (ou sites), l'expérience est réalisée sur des mâles castrés et des femelles d'un même génotype, alors que dans la cinquième localisation, des mâles castrés de deux génotypes ont été utilisés dans 2 expériences non contemporaines. Dans ce cas, il sera considéré que les 2 expériences sont réalisées dans 2 sites différents. Le nombre d'animaux expérimentaux par site variait de 60 à 128. Dans la conception des régimes, trois niveaux de concentration en EN (EN19 selon NOBLET et al., 1989) ont été retenus. Pour chaque niveau de valeur EN, les valeurs ED ou EM des régimes sont différentes. Les régimes 1 à 4 ont une concentration en énergie moyenne, alors que les régimes 5 et 6 sont faiblement concentrés en énergie et les régimes 7 et 8 ont une valeur énergétique élevée. Tous les régimes ont des teneurs en acides aminés essentiels couvrant les besoins de croissance des animaux. Dans chaque essai, les animaux sont alimentés individuellement et de façon aussi proche que possible du niveau à volonté, avec comme principale contrainte d'égaliser les vitesses de croissance entre les

8 régimes pendant tout l'essai. Les ajustements sont réalisés de façon hebdomadaire sur la base des performances moyennes par régime.

### 1.2.2. Conduite de l'essai de validation.

La mise en lots des animaux est réalisée dans tous les sites selon un dispositif en blocs, constitués de façon générale sur la base du poids vif et de l'âge. L'origine génétique a parfois été prise en compte pour la constitution des blocs. L'expérience proprement dite débute généralement après une semaine d'adaptation à l'aliment et à l'environnement. Tous les animaux sont alimentés individuellement avec logement individuel dans 5 des 6 sites. Les porcs sont pesés au cours de l'expérience, tous les 7 ou 14 jours selon les sites. Les quantités d'aliment consommé sont déterminées à partir des quantités allouées et des refus et de leurs teneurs en matière sèche.

Les porcs sont abattus à un poids vif de 102 à 105 kg, après une mise à jeûn de 12 à 16 heures. Dans tous les sites, on procède à la mesure du poids net et des données «Fat O Meater» afin d'estimer respectivement le rendement à l'abattage et le pourcentage de muscles. Selon les sites, des mesures complémentaires, telles que la détermination du poids du tube digestif plein et vide ou le poids de carcasse ressuyée ou le poids des morceaux selon la technique de la découpe parisienne, sont réalisées.

### 1.2.3. Mesure de la valeur nutritionnelle des régimes

Un «échantillon» de l'aliment effectivement consommé par les animaux est constitué lors des fabrications successives d'aliment pour les sites d'expérimentation. Sur ces «échantillons» représentatifs des 8 régimes, les teneurs en ED, en EM et en éléments digestibles sont mesurées dans deux essais de digestibilité réalisés dans deux sites différents, l'un sur des porcs de 45 kg et l'autre sur des porcs de 65 kg. Les deux groupes d'animaux reçoivent des quantités d'aliment comparables (1670 g de MS par jour en moyenne pour les 8 régimes), le rationnement étant effectué sur la base d'un même apport d'EN par jour pour tous les régimes. Dans les deux essais, les fèces sont collectées pendant 10 jours, à l'issue d'une période d'adaptation à l'aliment et à la contention en cage qui a également duré 10 jours. Dans un essai, les urines sont collectées. Les conditions de collecte, de traitement et d'analyse des échantillons ont été décrites par NOBLET et al. (1989). Les résultats (moyenne des deux essais) ont été utilisés pour le calcul des valeurs ED, EM et EN des 8 régimes (tableau 2 p, 240).

### 1.2.4. Calculs et analyses statistiques

Le gain moyen quotidien, la quantité de MS consommée et l'indice de consommation (MS par kg de gain) de chaque porc sont calculés pour les périodes de croissance et de finition et pour l'ensemble de l'expérience. Seules les données relatives à l'ensemble de la période expérimentale seront présentées. Le gain moyen quotidien est ensuite corrigé pour chacun des 8 régimes, afin de prendre en compte les écarts de poids des contenus digestifs à l'abattage entre régimes, écarts associés essentiellement aux différences de teneurs en parois végétales des aliments. En pratique, une correction moyenne issue des données de deux sites est appliquée pour chaque régime (tableau 10 p, 248).

L'indice de consommation, qu'il soit exprimé en MS ( $IC_{ms}$ ) ou en énergie ( $IC_{ED}$ , ...) par kg de gain de poids est lié linéairement

Tableau 2 - Composition chimique, utilisation digestive et valeur énergétique des régimes (essai 4).

Régime	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Composition centésimale, % de MS(1)</b>								
Blé	33,7	25,0	34,0	44,6	36,3	23,4	31,1	38,6
Manioc	13,5	15,0	10,0	13,0	15,0	15,0	15,0	4,0
T. de soja	6,0	10,8	19,3	6,8	2,6	3,1	12,2	22,8
T. de colza	7,0	5,0	4,0	5,8	7,0	6,0	6,8	
T. de tournesol	3,0	2,0	1,5	1,0	5,0	5,0	1,0	
Matières grasses (1)	2,5	5,0	2,5			2,5	5,0	5,5
Fibres (1)	5,4	15,5			10,3	19,5		
Pois	25,0	17,9	25,0	25,0	20,0	21,8	25,0	25,0
Acides aminés (1)	0,11	0,12	0,01	0,12	0,17	0,16	0,06	0,03
CMV	3,8	3,7	3,7	3,7	3,6	3,6	3,9	4,0
<b>Composition chimique, % MS</b>								
Matières minérales	6,1	6,3	6,1	5,4	6,0	6,4	5,9	6,1
Matières azotées	19,3	19,3	22,8	19,0	17,6	17,9	20,0	23,2
Matières grasses	4,2	6,7	4,6	1,9	2,0	4,3	6,5	6,9
Cellulose brute	5,5	6,8	4,9	4,7	6,7	8,0	4,7	4,3
NDF	13,4	16,3	10,9	10,9	14,6	16,3	10,7	9,9
ADF	7,1	8,2	6,2	5,9	8,1	9,6	5,9	4,9
ADL	1,3	1,3	0,9	1,1	1,6	1,7	1,2	0,5
Amidon	48,7	42,9	45,5	55,0	50,8	45,4	47,9	45,2
Sucres	4,8	4,5	4,9	4,6	4,7	4,7	4,8	4,8
Énergie brute, MJ/kg MS	18,36	18,87	18,59	17,88	17,84	18,24	18,90	19,22
<b>Coefficients d'utilisation digestive, % (2)</b>								
Matière sèche	85,0	81,8	87,2	88,5	84,3	81,3	85,8	86,7
Matière organique	87,3	84,0	89,4	90,6	86,6	83,5	88,1	89,00
Matières azotées	82,5	79,0	86,4	86,0	81,4	77,6	83,8	86,8
Matières grasses	60,0	64,8	65,2	51,9	52,7	60,8	62,6	63,77
Cellulose brute	50,1	48,1	57,6	57,7	48,7	48,2	51,7	60,6
Énergie	84,4	81,0	87,0	88,5	84,2	80,5	85,0	86,1
<b>EM/ED, %</b>	95,9	96,7	96,0	96,6	96,6	96,6	96,5	96,0
<b>Valeurs énergétiques, MJ/kg MS (3)</b>								
ED	15,51	15,28	16,17	15,82	15,02	14,69	16,06	16,54
EN6	11,13	10,94	11,32	11,36	10,70	10,45	11,63	11,66
EN19	11,17	11,00	11,44	11,42	10,71	10,45	11,75	11,92
EN <sub>nl</sub> 1	10,52	10,49	10,81	10,61	10,10	10,02	10,99	11,10
EN <sub>nl</sub> 2	10,77	10,68	11,01	10,96	10,39	10,27	11,24	11,34
EN <sub>j</sub>	9,58	9,40	10,02	9,82	9,23	9,03	9,95	10,20
EN <sub>g</sub> 2	11,15	10,96	11,38	11,38	10,75	10,51	11,62	11,68
EN <sub>g</sub> 4	11,13	10,97	11,44	11,37	10,70	10,45	11,65	11,86
EN <sub>g</sub> 11	11,08	10,98	11,36	11,29	10,59	10,51	11,84	11,98

(1) L'ajustement à 100% est fait avec le blé; le terme «matières grasses» correspond à un mélange (50/50) de suif et d'huile de colza; l'appellation «fibres» correspond à un mélange (25/25/25/25) de son de blé, de pulpes de betterave, de corn gluten feed et de coques de soja; acides aminés: lysine, méthionine et thréonine.

(2) Moyenne de deux essais de digestibilité conduits avec des porcs de 45 et 65 kg.

(3) Les valeurs EN sont calculées à partir des résultats de digestibilité moyens: EN6 et EN19 selon NOBLET et al. (1989), EN<sub>nl</sub>1 selon CVB (1988), EN<sub>nl</sub>2 selon IVVO (1993; communication personnelle: tableau 1), EN<sub>j</sub> selon Just (1982) (tableau 1) et EN<sub>g</sub>2, EN<sub>g</sub>4 et EN<sub>g</sub>11 selon tableau 9, p 245.

à la concentration en énergie du gain pondéral, cette dernière étant fonction de la composition tissulaire, appréciée dans l'essai à partir de la teneur en muscles (%FOM). Les conditions

de mesure de la valeur FOM (appareil, expérimentateur, conformation des animaux, ...) varient selon le site expérimental. Les indices de consommation (matière sèche ou énergie par

**Tableau 3** - Effet du stade de croissance sur la valeur énergétique et l'utilisation métabolique de l'énergie de 7 régimes (essai 2).

	Stade			ETR (1,2)	Stat. (1,2)
	1	2	3		
<b>Poids vif, kg</b>	45 <sup>a</sup>	103 <sup>b</sup>	150 <sup>c</sup>	8	S <sup>**</sup>
<b>MS ingérée, g/j (3)</b>	1520 <sup>a</sup>	2287 <sup>b</sup>	2551 <sup>c</sup>	253	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup>
<b>CUD énergie, %</b>	83,2 <sup>a</sup>	85,5 <sup>b</sup>	86,3 <sup>c</sup>	1,1	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup> ;RxS <sup>**</sup>
<b>Énergie du méthane, % ED</b>	0,51 <sup>a</sup>	0,68 <sup>b</sup>	0,83 <sup>c</sup>	0,27	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup>
<b>Énergie de l'urine, % ED</b>	2,25 <sup>a</sup>	4,02 <sup>b</sup>	4,23 <sup>b</sup>	0,43	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup> ;RxS <sup>**</sup>
<b>EN/EM, % (2)</b>	74,9	75,0	74,4	2,4	R <sup>**</sup>
<b>EN/ED, % (2)</b>	72,9 <sup>a</sup>	71,5 <sup>b</sup>	70,6 <sup>b</sup>	2,3	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup>
<b>Valeurs énergétiques, MJ/kg MS</b>					
ED	15,48 <sup>a</sup>	15,90 <sup>b</sup>	16,03 <sup>c</sup>	0,21	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup>
ED gros intestin (2,4)	2,23	2,65	2,78		
EM	15,06 <sup>a</sup>	15,16 <sup>b</sup>	15,23 <sup>c</sup>	0,19	R <sup>**</sup> ;S <sup>**</sup> ;RxS <sup>**</sup>
EN (2)	11,29	11,38	11,35	0,39	R <sup>**</sup>

(1) A partir de l'analyse de variance qui prend en compte les effets du régime (R; n=7), du stade de croissance (S; n=3) et de l'interaction entre le régime et le stade (4 observations par traitement). Niveaux de signification: <sup>\*</sup>: P<0,01; <sup>\*</sup>: P<0,05. Pour chaque ligne, les valeurs suivies du même exposant ne diffèrent pas significativement (P>0,05)

(2) Analyse de variance réalisée sur les moyennes (21 observations) des traitements: l'interaction ne peut être testée.

(3) MS ingérée au niveau d'alimentation élevé (voir matériel et méthodes).

(4) Calculé par différence avec une valeur ED iléale moyenne de 13,25 MJ/kg MS, mesurée chez des porcs de 40-45 kg munis d'une anastomose iléo-rectale (SHI et NOBLET, 1993b).

kg de gain corrigé pour un même contenu digestif) de chaque animal ont donc été ajustés, intra-site, en fonction de l'écart entre sa teneur en muscles FOM à l'abattage et la valeur FOM moyenne du site. Le coefficient de correction est obtenu par analyse de covariance (effet principal: régime; covariable: FOM; l'interaction régime x FOM n'est pas significative) sur les données de chaque site.

L'analyse statistique des résultats de l'essai de validation a d'abord été réalisée pour chaque site expérimental puis sur les données des 6 sites. De façon à simplifier l'interprétation des résultats, nous ne présenterons que les données moyennes des 6 sites (tableau 10). Les résultats des 6 sites ont été soumis à une analyse de variance prenant en compte les effets régime (R) et site (S) et l'interaction régime x site (RxS).

Enfin, IC<sub>ms</sub> est inversement proportionnel à la concentration en énergie de l'aliment, l'inverse de IC<sub>ms</sub> (1/IC<sub>ms</sub>) étant donc linéairement et positivement lié à la valeur énergétique du régime. La capacité d'un système énergétique à prédire les performances des animaux peut alors s'apprécier par la précision (R<sup>2</sup>) de la relation liant 1/IC<sub>ms</sub> à la concentration en énergie du régime. De la même façon, dans un « bon » système énergétique, IC exprimé en unité d'énergie par kg de gain doit être constant (faible variabilité) et indépendant de la concentration en énergie de l'aliment ou de l'une de ses caractéristiques chimiques. Ces deux approches ont été appliquées aux résultats moyens de chaque régime (tableau 11).

Toutes les analyses statistiques relatives à l'essai de validation ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS (1988). Les principales conclusions seront présentées dans la partie discussion de cette synthèse.

## 2. RÉSULTATS

### 2.1. Rendements d'utilisation de l'énergie métabolisable

Comme l'indique le tableau 1, le rendement d'utilisation de l'EM pour la croissance (k<sub>g</sub>) est en moyenne de 74% et varie, pour l'ensemble des 61 régimes distribués aux porcs de 45 kg, de 69 à 77%. Compte tenu d'un rapport EM/ED voisin de 96%, le rapport EN/ED est en moyenne de 71%. Les résultats de l'essai 2 montrent que k<sub>g</sub> n'est pas significativement affecté par le stade de croissance, la valeur moyenne estimée sur les 7 régimes étant proche de celle obtenue avec les 61 régimes de l'essai 1 (tableau 3). Toutefois, les pertes d'énergie dans les urines et sous forme de méthane sont accrues chez les animaux les plus lourds, ce qui a pour conséquence une diminution (P<0,01) du rapport EN/ED avec l'augmentation du poids vif des animaux (tableau 3).

Les données du tableau 4 mettent en évidence que, pour une même série de régimes, l'utilisation digestive de l'énergie est supérieure chez la truie à l'entretien. De la même façon, le rendement d'utilisation de l'EM est plus élevé (P<0,01) pour la couverture des dépenses énergétiques d'entretien (k<sub>m</sub>) chez la truie que pour la croissance (77 vs 73%). Toutefois, le rapport EM/ED est significativement plus faible chez la truie que chez le porc en croissance, en relation avec des pertes d'énergie plus élevées dans les urines et sous forme de méthane. Il en résulte que les rapports EN/ED sont proches chez la truie à l'entretien et chez le porc en croissance (environ 71% pour la même série de 14 régimes). Il convient cependant de noter que dans les conditions habituelles d'alimentation, la teneur en matières azotées du régime est plus faible chez la truie à l'entretien ou en gestation que chez le porc en croissance, ce

**Tableau 4.** - Influence du stade physiologique sur les valeurs énergétiques et l'utilisation métabolique de l'énergie de 14 régimes chez le porc (essai 3).

	Truie à l'entretien	Porc en croissance	ETR (2,3)	Stat (2,3)
Poids vif, kg	208	43	4	S**
MS ingérée, g/j (4)	1580	1515	106	R**,S**
CUD énergie	84,7	75,8	1,7	R**,S**,RxS**
Énergie du méthane, % ED	1,34	0,44	0,18	R**,S**,RxS**
Énergie de urine, % ED	6,35	3,11	0,99	R**,S**
EN/EM, % (3)	77,4	73,5	1,6	R*,S**
EN/ED, % (3)	71,4	70,9	1,6	R**
<b>Valeurs énergétiques, MJ/kg MS</b>				
ED	15,62	13,96	0,32	R**,S**,RxS**
ED gros intestin (3,5)	3,84	2,20	0,37	R**,S**
EM	14,43	13,49	0,35	R**,S**,RxS**
EN (3)	11,16	9,93	0,34	R**,S**

(1) La composition chimique et les résultats de digestibilité des 14 régimes ont été rapportés par NOBLET et al. (1993a).

(2) À partir de l'analyse de variance qui prend en compte les effets du régime (R; n=14), du stade physiologique (S; n=2) et de l'interaction entre le régime et le stade (4 observations par traitement). Niveaux de signification: \*\*: P<0,01; \*: P<0,05.

(3) Analyse de variance réalisée sur les moyennes (28 observations) des traitements: l'interaction ne peut être testée.

(4) MS ingérée au niveau d'alimentation élevé (voir matériel et méthodes).

(5) Calculé par différence avec une valeur ED iléale moyenne de 11,68 MJ/kg MS, mesurée chez des porcs de 40-45 kg munis d'une anastomose iléo-rectale (SHI et NOBLET, 1993a).

**Tableau 5** - Effets de la composition du régime (g/kg MS) et du site de digestion (EDh%: % de ED dégradée dans le gros intestin) sur l'utilisation métabolique de l'énergie (EN/EM, %) pour la croissance ( $k_g$ ) ou l'entretien ( $k_m$ ).

Essai	Équation	R <sup>2</sup>	ETR
1	$k_g = 74,7 + 0,036 \times MG + 0,009 \times \text{Amidon} - 0,023 \times \text{MAT} - 0,026 \times \text{ADF}$	0,66	1,2
1+2	$k_g = 75,8 + 0,032 \times MG + 0,007 \times \text{Amidon} - 0,021 \times \text{MAT} - 0,034 \times \text{ADF}$	0,67	1,2
3	$k_g = 67,2 + 0,066 \times MG + 0,016 \times \text{Amidon}$	0,57	1,9
1	$k_m = 76,2 - 0,18 \times \text{EDh\%}$	0,22	1,8

qui conduit à atténuer légèrement les différences observées.

Que ce soit pour la croissance ou pour l'entretien, le rendement d'utilisation de l'EM est significativement affecté par la nature du régime (tableaux 3 et 4). Les relations rapportées au tableau 5 montrent alors que  $k_g$  et  $k_m$  varient avec les caractéristiques chimiques de l'aliment; les deux coefficients sont positivement affectés par les teneurs en amidon ou en matières grasses, alors que seul  $k_g$  est abaissé lorsque les teneurs en matières azotées ou en parois végétales sont accrues.

Ces effets de la composition de l'aliment sur le rendement d'utilisation de l'EM sont le reflet de différences dans l'utilisation de l'EM des différents éléments digestibles (tableau 6). Les valeurs les plus élevées, tant pour la croissance que pour l'entretien sont obtenues pour les matières grasses (respectivement 90 et 100%) et l'amidon (82% dans les 2 cas), et les plus faibles avec les matières azotées (respectivement 58 et 69%) et les parois végétales (respectivement 58 et 56%). Le

rendement d'utilisation de l'EM apportée par les sucres est intermédiaire et proche de la valeur moyenne mesurée sur les régimes. Dans le cas des animaux en croissance, l'analyse des données fait également apparaître des différences dans l'utilisation des différentes composantes de la fraction parois végétales digestibles, l'EM de la cellulose digestible n'apportant apparemment pas d'énergie nette. Il est également à noter que la hiérarchie des valeurs entre les différents éléments digestibles est la même pour la croissance et pour l'entretien.

La fraction de l'ED digérée avant la fin de l'intestin grêle (ED<sub>i</sub>) a été mesurée sur tous les régimes étudiés, permettant ainsi de calculer, par différence, la quantité d'énergie dégradée dans le gros intestin (ED<sub>h</sub>). Selon la même approche que pour les éléments digestibles, il est alors possible de calculer le rendement d'utilisation de l'EM (ou de l'ED) provenant de la digestion dans les deux compartiments du tube digestif (tableau 6). Dans la mesure où l'énergie en provenance du gros intestin correspond essentiellement à la fermentation des parois végétales

**Tableau 6** - Rendements de transformation de l'ED ou de l'EM en EN (%) selon la nature des constituants chimiques ou le site de digestion chez le porc en croissance ou la truie à l'entretien (1).

	EN/EM, %		EN/ED, %	
	Croissance	Entretien	Croissance	Entretien
<b>Régimes</b>	73,9	77,4	71,0	71,4
<b>Eléments digestibles</b>				
Matières azotées	58	69	50	60
Matières grasses	90	102	90	100
Amidon	82	82	82	81
Sucres	73	82	72	81
NDF - ADF	66	-	69	-
ADF	0	-	0	-
Résidu (2)	77	-	70	-
		58 (3)	54 (3)	43 (4)
<b>ED iléale</b>	76	82	74	80
<b>ED gros intestin</b>	58	59	54	46

(1) Les rendements sont calculés à partir des coefficients des équations de régression linéaire multiple liant les teneurs en ED, EM ou EN aux teneurs en éléments digestibles ou en ED dégradée avant la fin de l'iléon ou dans le gros intestin (NOBLET et al., 1994a; 1993c).

(2) Résidu digestible correspond à la différence entre la matière organique digestible et la somme des éléments digestibles considérés dans l'équation de régression.

(3) Valeur moyenne pour la totalité des fibres, calculée à partir des rendements de NDF - ADF, ADF et Résidu, des quantités moyennes de ces 3 constituants dans les 61 régimes de l'essai 1 (tableau 1) et de leurs teneurs moyennes en ED, EM et EN (NOBLET et al., 1994a).

(4) Valeur moyenne pour la totalité des fibres, calculée par régression.

**Tableau 7** - Influence du stade de croissance et de la composition chimique du régime sur l'utilisation métabolique de l'énergie (essai 2).

Régime (2)	1 Base	2 +amidon	3 +saccharose	4 +protéines	5 +huile	6 +fibres	7 +huile/fibres
<b>Composition chimique, g/kg MS</b>							
Matières minérales	67	49	55	64	61	68	62
Matières azotées	206	151	168	290	189	181	162
Matières grasses	25	19	18	22	108	24	107
Cellulose brute	41	32	40	38	40	108	105
NDF	128	97	108	123	115	260	243
ADF	46	36	36	42	43	128	124
ADL	7	5	5	5	6	16	15
Amidon	503	636	374	436	455	390	343
Sucres	44	30	282	37	39	41	39
Énergie brute, MJ/kg MS	18,05	18,02	17,66	18,71	19,90	18,06	19,89
<b>EN/EM (x100)</b>							
Stade 1	74,7	76,4	74,9	73,2	77,0	72,2	76,1
Stade 2	74,1	77,1	75,5	74,3	78,1	71,6	74,0
Stade 3	73,6	76,9	76,0	73,6	77,0	70,7	73,0
Moyenne (1)	74,1 <sup>f</sup>	76,8 <sup>g</sup>	75,5 <sup>g</sup>	73,7 <sup>f</sup>	77,3 <sup>g</sup>	71,5 <sup>e</sup>	74,4 <sup>f</sup>
<b>EN/ED (x100)</b>							
Stade 1	72,7	74,4	72,8	71,4	75,0	69,9	73,9
Stade 2	70,4	74,4	72,0	69,4	74,8	68,3	70,9
Stade 3	69,7	74,0	72,6	68,3	73,5	66,6	69,7
Moyenne (1)	70,9 <sup>g</sup>	74,3 <sup>h</sup>	72,4 <sup>g</sup>	69,7 <sup>ef</sup>	74,4 <sup>h</sup>	68,3 <sup>e</sup>	71,5 <sup>g</sup>

(1) Pour chaque ligne, les valeurs suivies du même exposant ne diffèrent pas significativement ( $P > 0,05$ ). Analyse de variance réalisée sur les moyennes des traitements (21 observations).

(2) Les variations dans la composition des régimes sont obtenues par addition à un régime de base (céréales + soja) d'amidon de maïs ou de saccharose ou d'un mélange caséine + protéines de soja ou d'huile de colza ou d'un mélange de matières premières riches en fibres ou de l'association huile de colza + matières premières riches en fibres (NOBLET et al., 1993a).

de l'aliment, il n'est pas surprenant que le rapport EN/EM pour EDh (58 et 59% respectivement chez le porc en croissance et la truie à l'entretien) soit comparable à celui obtenu pour les parois végétales. Dans les 2 situations, le rapport EN/EM pour EDh est plus faible que lorsque l'énergie est absorbée avant la fin de l'iléon (76 et 82% respectivement, pour la croissance et l'entretien). La valeur plus élevée mesurée chez la truie à l'entretien est à relier aux rendements plus élevés de l'EM des matières grasses digestibles et des matières azotées digestibles pour la couverture des dépenses d'entretien, ces éléments étant digérés presque totalement avant la fin de l'iléon. Enfin, la différence de rendement d'utilisation de l'EM selon son origine dans le tractus digestif explique la relation linéaire négative entre  $k_g$  et la proportion de l'énergie du régime en provenance du gros intestin (tableau 5).

Les variations du rapport EN/EM entre les différents régimes de l'essai 2 s'expliquent par la nature de la matière première ajoutée au régime de base (tableau 7). Ainsi, l'addition d'huile de colza ou d'amidon de maïs ou, dans une moindre mesure, de saccharose se traduit par un accroissement de  $k_g$ , alors que l'apport de matières azotées et surtout de parois végétales entraîne une diminution de  $k_g$ . Il en résulte que les rendements d'utilisation de l'EM des matières premières ajoutées au régime de base (calculés à l'aide de la méthode par différence; tableau 8) sont en accord avec les différences de rendements d'utilisation de l'EM des éléments digestibles, estimés à partir

**Tableau 8** - Effet du stade de croissance sur l'utilisation métabolique de l'énergie de quelques matières premières (essai 2)(1).

	EN/EM, %	EN/ED, %	EN, MJ/kg MS
<b>Amidon de maïs</b>			
Stade 1	80	78	13,9
Stade 2	83	83	14,7
Stade 3	83	83	14,9
<b>Saccharose</b>			
Stade 1	76	73	11,4
Stade 2	81	78	12,5
Stade 3	83	82	13,8
<b>"Protéines" (2)</b>			
Stade 1	66	65	14,6
Stade 2	76	65	14,6
Stade 3	73	62	14,9
<b>Huile de colza</b>			
Stade 1	88	85	29,9
Stade 2	94	94	35,5
Stade 3	90	89	34,2
<b>"Fibres" (2)</b>			
Stade 1	60	56	4,0
Stade 2	62	60	5,2
Stade 3	60	55	5,4

(1) Les teneurs en ED, EM et EN de chaque matière première sont calculées par différence entre le résultat obtenu sur le régime contenant la matière première et celui du régime de base (NOBLET et al., 1993a).

(2) «Protéines» correspond à un mélange de 50% de caseïne de soja et 50% d'isolat de soja; «fibres» consiste en un mélange de 25% de son de blé, 25% de pulpes de betterave, 25% de coques de soja et 25% de paille de blé.

des données des 61 régimes de l'essai 1 (tableau 6). À titre d'exemple, les rapports EN/EM obtenus pour l'amidon de maïs et l'huile de colza sont respectivement 82 et 90%, les mêmes valeurs étant calculées pour l'amidon et les matières grasses digestibles mesurées dans l'aliment. Il en est de même pour le mélange de matières premières riches en parois végétales, comparativement aux parois végétales digestibles. Le résultat obtenu pour la source de protéines est plus élevé (72% en moyenne pour les 3 stades de croissance) que celui obtenu pour les matières azotées digestibles (58%).

Enfin, compte tenu de l'absence d'interaction entre le stade de croissance et le régime sur les rapports EN/EM ou EN/ED (tableau 3), les données des tableaux 7 et 8 montrent que les écarts de rendements d'utilisation de l'EM entre les régimes ou les matières premières de l'essai 2 sont les mêmes aux 3 stades étudiés. Il en résulte que l'équation de régression entre  $k_g$  et les critères de composition chimique obtenue avec les données de l'essai 1 n'est pas modifiée lorsque les résultats obtenus sur les porcs des stades 2 et 3 de l'essai 2 sont combinés avec ceux de l'essai 1 (tableau 5).

## 2.2. Prédiction de la valeur énergétique nette des aliments.

Trois approches principales ont été utilisées pour la prédiction de la teneur en EN des aliments pour la croissance ou pour l'entretien. Dans la première, la teneur en EN correspond à une combinaison linéaire des teneurs en éléments digestibles selon différents modes de fractionnement de la matière organique digestible. Dans la seconde approche, la valeur EN est calculée à partir de la teneur en ED ou en EM et de quelques caractéristiques chimiques brutes de l'aliment, sélectionnées par la technique de la régression multiple progressive. La dernière approche a consisté en l'établissement d'équations de régression, également par la technique de la régression multiple progressive, entre la valeur EN et les critères de composition chimique de l'aliment. Pour chaque équation, la signification statistique de l'ordonnée à l'origine a été testée. Les principales équations obtenues sont rassemblées dans le tableau 9.

En raison probablement d'un nombre plus élevé d'observations et d'une variabilité plus importante des données chez le porc en croissance que chez la truie à l'entretien, les équations basées sur les teneurs en éléments digestibles font intervenir un nombre plus élevé de prédicteurs dans le cas de la croissance. En particulier, la prise en compte des critères cellulose brute digestible ou ADF digestible améliore la prédiction chez le porc en croissance. Par ailleurs, le coefficient affecté à la teneur en sucres est identique à celui obtenu pour l'amidon chez la truie à l'entretien alors que, chez l'animal en croissance, il est comparable au coefficient calculé pour le paramètre «Résidu digestible» qui inclut l'essentiel des parois végétales digestibles.

Les résultats de la seconde approche montrent que les seuls critères teneurs en ED ou en EM ne permettent pas une prédiction satisfaisante de la teneur en EN des aliments. Ainsi, dans le cas de la croissance, les «meilleures» équations (ou équations à faible écart-type résiduel) sont obtenues lorsque les critères teneurs en amidon, en matières grasses et en matières azotées et un indicateur des parois végétales sont considérés. Il faut noter que, conformément aux différences de rendements d'utilisation des éléments digestibles de l'aliment (tableau 6), l'amidon et les matières grasses ont un effet positif, alors que les 2 autres caractéristiques chimiques ont un effet

négalif. L'interprétation des équations correspondantes obtenues chez la truie à l'entretien est plus délicate, compte tenu notamment de l'existence d'une ordonnée à l'origine

significativement différente de zéro. Dans les deux situations physiologiques, la meilleure précision est procurée par les équations basées sur la teneur en EM, l'écart-type résiduel

**Tableau 9** - Équations de prédiction de la teneur en EN (MJ/kg MS) des aliments pour la couverture des dépenses de croissance ( $EN_g$ ) ou d'entretien ( $EN_m$ ) en fonction des teneurs en éléments digestibles, en ED ou EM (MJ/kg MS) et/ou de quelques caractéristiques chimiques (g/kg MS) chez le porc (1).

Numéro	Équation	RSD
<b>Croissance (n = 61)</b>		
1	$EN_g = 0,0114 \times MAD + 0,0350 \times MGD + 0,0144 \times AM + 0,000 \times ADFD + 0,0123 \times ResD$	0,20
2	$EN_g = 0,0113 \times MAD + 0,0350 \times MGD + 0,0144 \times AM + 0,000 \times CBD + 0,0121 \times ResD$	0,21
3	$EN_g = 0,843 \times ED - 1,94$	0,30
4	$EN_g = 0,703 \times ED + 0,0066 \times MG + 0,0020 \times AM - 0,0041 \times MAT - 0,0041 \times CB$	0,18
5	$EN_g = 0,700 \times ED + 0,0067 \times MG + 0,0020 \times AM - 0,0038 \times MAT - 0,0036 \times ADF$	0,18
6	$EN_g = 0,870 \times EM - 1,85$	0,24
7	$EN_g = 0,730 \times EM + 0,0055 \times MG + 0,0015 \times AM - 0,0028 \times MAT - 0,0041 \times CB$	0,17
8	$EN_g = 0,726 \times EM + 0,0056 \times MG + 0,0016 \times AM - 0,0026 \times MAT - 0,0035 \times ADF$	0,17
11	$EN_g = 12,03 + 0,0183 \times MG + 0,0028 \times AM - 0,0230 \times MM - 0,0084 \times (NDF - ADF) - 0,0168 \times ADF$	0,2
<b>Croissance (n = 75) (2)</b>		
2bis	$EN_g = 0,0118 \times MAD + 0,0346 \times MGD + 0,0143 \times AM + 0,000 \times CBD + 0,0121 \times ResD$	0,22
4bis	$EN_g = 0,720 \times ED + 0,0058 \times MG + 0,0016 \times AM - 0,0041 \times MAT - 0,0050 \times CB$	0,18
7bis	$EN_g = 0,760 \times EM + 0,0043 \times MG + 0,0010 \times AM - 0,0031 \times MAT - 0,0050 \times CB$	0,17
<b>Entretien (n = 14)</b>		
1	$EN_m = 0,0142 \times MAD + 0,0384 \times MGD + 0,0139 \times (AM + SU) + 0,0074 \times ResD$	0,26
2	$EN_m = -4,45 + 1,128 \times ED - 0,0098 \times MAT$	0,22
3	$EN_m = -7,30 + 1,299 \times EM - 0,0053 \times MAT + 0,0125 \times CB$	0,18
4	$EN_m = -7,13 + 1,291 \times EM - 0,0054 \times MAT + 0,0101 \times ADF$	0,19
5	$EN_m = 14,74 - 0,0283 \times MM + 0,0206 \times MG - 0,0120 \times NDF$	0,33

(1) MM, MAT, MG, AM, SU, CB pour matières minérales, matières azotées, matières grasses, amidon, sucres et cellulose brute. MAD, MGD, ADFD, CBD respectivement pour MAT digestibles, MG digestibles, ADF digestible et cellulose brute digestible. Pour chaque équation, le terme ResD correspond à la différence entre la matière organique digestible et les autres éléments digestibles considérés dans l'équation.

(2) Équations calculées à partir des données des 61 régimes de l'essai 1 (ou stade 1) et des 7 régimes mesurés aux stades 2 et 3 dans l'essai 2 (l'effet stade n'est pas significatif).

représentant par exemple 1,6% de la teneur moyenne en EN chez l'animal en croissance.

Chez la truie à l'entretien ou le porc en croissance, les équations de prédiction basées sur les caractéristiques chimiques brutes ont la précision la plus faible, avec une ordonnée à l'origine significativement différente de zéro. Dans le cas des animaux en croissance, tous les critères, à l'exception de la teneur en matières azotées, interviennent dans l'équation. Comme pour les équations basées sur les teneurs en éléments digestibles, un nombre plus limité de caractéristiques chimiques est pris en compte dans le cas de la truie à l'entretien.

### 3. DISCUSSION.

#### 3.1. Aspects méthodologiques.

La valeur EN d'un aliment correspond à la différence entre sa valeur EM et l'extra-chaleur associée à l'utilisation de l'EM. L'extra-chaleur peut être calculée pour chaque animal en mesurant sa production de chaleur à au moins deux niveaux

d'alimentation très différents. Toutefois, cette méthode n'est pas très précise. Une solution alternative consiste alors à mesurer ou estimer la production de chaleur au jeûne (FHP), l'extra-chaleur de la totalité de l'EM ingérée étant alors calculée par différence entre la production de chaleur à un niveau d'alimentation standard et FHP (figure 1, p 238). **La valeur EN de l'aliment est alors directement dépendante de l'estimation de FHP**, aussi bien par exemple chez la truie à l'entretien que chez le porc en croissance. Les écarts entre la valeur EN moyenne des 61 régimes déterminée dans l'essai 1 et celle prédite, pour les mêmes régimes, à partir des équations proposées par SCHIEMANN et al. (1972) ou JUST (1982) (tableau 1, p 237) sont essentiellement dus à des estimations différentes de FHP (NOBLET et HENRY, 1991).

Par ailleurs, cette approche met en évidence l'intérêt de limiter les variations de la production de chaleur totale et de FHP qui ne sont pas directement associées à la nature de l'aliment ingéré. Une illustration de cet aspect est apportée dans l'essai 3 pour lequel il était primordial d'estimer le coût énergétique de l'activité physique, afin de réduire la variabilité de la production de chaleur non liée à l'aliment. De la même façon, pour les

animaux en croissance de l'essai 1, la variabilité a été atténuée en prenant, pour l'ensemble de l'expérience, des animaux aussi comparables que possible (génotype, poids vif) et maintenus dans des conditions d'environnement stables. Dans ce cas, on peut supposer que FHP est peu variable entre les animaux, l'attribution d'une valeur constante, dans le calcul de la valeur EN de tous les régimes de l'étude, ayant peu de conséquences sur le calcul de la valeur EN d'un aliment. De telles conditions ne sont pas entièrement remplies dans les études précitées de SCHIEMANN et al. (1972) ou de JUST (1982).

Dans le cas des animaux en croissance, FHP n'est généralement pas mesurée mais calculée par extrapolation de la production de chaleur pour une quantité d'EM ingérée nulle. De plus, les mesures de production de chaleur sont généralement réalisées, comme dans l'essai 1, à des niveaux d'alimentation supérieurs à celui permettant de couvrir les dépenses d'entretien. Lors de l'extrapolation, il est alors supposé que l'extra-chaleur est la même au-dessus et au-dessous de l'entretien. Or, les résultats de l'essai 3 ( $k_m > k_g$ ) révèlent un écart significatif. Cet écart est confirmé dans l'essai 2 où les animaux ont été mesurés à 3 niveaux d'alimentation (ad libitum, proche de l'entretien et à jeûn), permettant ainsi de calculer, sur le même groupe d'animaux, l'extra-chaleur au-dessus de l'entretien (25%) et celle au-dessous de l'entretien (20%). Il en résulte que 2 estimations de FHP, différant d'environ 10% et, par suite, 2 valeurs EN peuvent être calculées pour le même régime (NOBLET et al., 1994b).

En définitive, **toute valeur EN d'un aliment** qu'elle soit mesurée ou calculée, à partir d'une équation elle-même issue de mesures, **doit être considérée en fonction de la méthode de calcul de l'extra-chaleur** ou, plus simplement, de l'estimation de la production de chaleur au jeûn. C'est pourquoi il est délicat, voire incorrect, de comparer dans l'absolu des valeurs EN estimées selon différents systèmes.

### 3.2. Effets du stade de croissance ou du stade physiologique sur la valeur EN des aliments.

Nos travaux sur la prédiction de la valeur EN des aliments du porc en croissance ont donné lieu à une première publication par NOBLET et al. (1989), réalisée à partir des données de 41 régimes. La comparaison de ces premières équations à celles rapportées dans le tableau 9 et établies à partir d'un nombre plus important de régimes ( $n = 61$ ) fait apparaître des modifications légères des coefficients obtenus, sans que toutefois la hiérarchie entre les prédicteurs soit modifiée. Les équations du tableau 9 sont toutefois préférables, compte tenu notamment de leur précision plus élevée.

Des études antérieures (NOBLET et SHI, 1993; NOBLET et al., 1993a), dont quelques résultats moyens sont présentés dans les tableaux 3 et 4, ont montré que la digestibilité de l'énergie ou la teneur en ED d'un régime varient avec le stade physiologique, le poids vif des animaux ou le niveau d'alimentation; les variations sont généralement les plus importantes avec les aliments riches en parois végétales. Toutefois, en raison de modifications concomitantes de la production de méthane et de la quantité d'énergie dans les urines, les écarts de valeur énergétique entre stades physiologiques (tableau 4, p 242) ou stades de croissance (tableau 3, p 241) sont atténués sur la base de leurs teneurs en EM. Ils demeurent toutefois importants pour des régimes ou des matières premières riches en parois végétales, surtout lorsque, par exemple, la truie adulte

alimentée de façon restreinte est comparée au porc en croissance (NOBLET et al., 1993a). Dans ce cas, **un même aliment a des teneurs en ED ou en EM variant avec le type d'animal qui le consomme.**

La prédiction la plus précise de la teneur en EN des aliments est basée sur les données issues de mesures de digestibilité. L'objet principal des essais 1, 2 et 3 est précisément de quantifier les effets du poids vif ou du stade physiologique sur la relation entre les données de digestibilité (éléments digestibles, ED, EM, ...) et la teneur en EN.

L'analyse de covariance réalisée sur les données des essais 1 et 2 ( $n = 75$ ) avec, comme covariables, les prédicteurs des équations  $EN_g2$  ou  $EN_g4$  ou  $EN_g7$  (tableau 9) et, comme effet principal, le stade de croissance, ne fait apparaître aucun effet significatif du stade ( $P > 0,05$ ) sur la valeur EN. Il en résulte que les équations de prédiction de la teneur en EN établies à partir des 75 mesures réalisées sur porcs en croissance sont très comparables à celles de l'essai 1 (tableau 9). On peut donc conclure que **les mêmes équations de prédiction prenant en compte les résultats de la digestibilité peuvent être appliquées au porc de 40 à 150 kg.**

Les résultats de l'essai 3 ont montré que  **$k_m$  est plus élevé que  $k_g$** , la valeur  $EN_m$  étant alors plus élevée que la valeur  $EN_g$ , pour une même valeur EM. Cette observation est confirmée dans l'analyse de covariance réalisée sur les teneurs en EN issues des 89 mesures des essais 1, 2 et 3 avec, comme covariables, les variables des équations  $EN_g7$  ou  $EN_g8$  basées sur la teneur en EM (tableau 9) et comme effet principal, le stade physiologique (truies à l'entretien de l'essai 3 vs porcs en croissance des essais 1 et 2) qui est hautement significatif ( $P < 0,01$ ). L'analyse de covariance, utilisant comme covariables les variables des équations prenant en compte les teneurs en éléments digestibles ( $EN_g1$ , par exemple) ou en ED et quelques caractéristiques de composition chimique ( $EN_g4$ , par exemple), fait également apparaître un effet du stade physiologique ( $P < 0,05$ ). L'écart entre les valeurs EN des 2 stades physiologiques, ajustées pour les mêmes données de digestibilité, représente dans ce dernier cas en moyenne 2% de la valeur mesurée chez l'animal en croissance (contre 5% lorsque l'ajustement est réalisé à partir de l'EM). En d'autres termes, comparativement au porc en croissance, la supériorité de  $k_m$  chez la truie à l'entretien est partiellement annulée par les pertes d'énergie dans les urines et sous forme de méthane, plus importantes à ce stade physiologique.

Les mêmes conclusions sont obtenues lorsque les valeurs  $EN_m$  des régimes de l'essai 3 sont comparées aux valeurs EN calculées à partir des équations de prédiction obtenues chez le porc en croissance (tableau 9), avec les données de digestibilité mesurées sur les truies ( $EN_{ca1}$ ). Dans ce cas, aucune caractéristique de l'aliment n'est en mesure d'expliquer ( $P > 0,10$ ) les écarts entre  $EN_m$  et  $EN_{ca1}$ . **L'application des équations de prédiction de la teneur en EN établies pour la croissance (notamment celles basées sur les teneurs en ED ou en éléments digestibles) au calcul de la valeur  $EN_m$  entraînent donc une légère sous-estimation de la valeur EN, sans modifier la hiérarchie entre aliments**, comparativement à celle obtenue par l'utilisation des équations spécifiques à l'entretien. La sous-estimation peut cependant devenir plus importante pour des matières premières particulièrement riches en matières grasses ou en matières azotées, nutriments pour lesquels les rendements de transformation de l'ED ou de l'EM en EN diffèrent entre la truie à l'entretien et le porc en

croissance (tableau 6, p 243).

**Les équations de prédiction de la teneur en EN basées sur les critères de composition chimique brute** ne peuvent pas prendre en compte les variations de la digestibilité dues au poids vif et/ou au niveau d'alimentation. Par ailleurs, les équations établies dans des conditions de mesure bien déterminées (poids vif des animaux, niveau d'alimentation) reposent sur des valeurs moyennes des coefficients de digestibilité, des rapports EM/ED et des rendements EN/EM des constituants chimiques. Leur application peut par conséquent entraîner des erreurs importantes pour des régimes et surtout des matières premières dont les nutriments ont des digestibilités très différentes des valeurs moyennes obtenues sur les régimes de référence. En fait, de telles équations **ne sont pas en mesure de prédire la valeur EN à différents stades de croissance et, a fortiori, à différents stades physiologiques**. De plus, leur utilisation doit être réservée aux régimes.

### 3.3. Comparaison des systèmes énergie nette

Des systèmes de prédiction de la teneur en EN des aliments chez le porc ont été proposés par SCHIEMANN et al. (1972) ( $EN_s$ ) et JUST (1982) ( $EN_j$ ); de plus, une équation issue des travaux de SCHIEMANN et al. (1972) et NOBLET et al. (1989) a été adoptée récemment aux Pays-Bas ( $EN_{ni}$ ; IVVO, communication personnelle). Les équations de prédiction sont rapportées au tableau 1, les conditions de leur établissement ayant été décrites par NOBLET et HENRY (1993). Les teneurs en EN des 61 régimes de l'essai 1 ont été calculées selon chacune des équations et comparées aux valeurs mesurées. Les résultats moyens sont rapportés au tableau 1 (p 237).

En premier lieu, il apparaît que les valeurs moyennes de  $EN_s$ ,  $EN_j$  et  $EN_{ni}$  sont inférieures à la valeur moyenne mesurée (respectivement 9,89, 8,76 et 10,12 MJ/kg MS contre 10,50 MJ/kg MS). Comme nous l'avons expliqué au paragraphe 3.1, les écarts moyens entre les 3 estimations de EN et la valeur obtenue dans notre étude sont à relier à des estimations différentes de FHP. Cependant, en accord avec les observations de NOBLET et al. (1989), l'écart entre les valeurs  $EN_s$ ,  $EN_j$  ou  $EN_{ni}$  et EN n'est pas directement proportionnel à la valeur EN. Il s'explique en fait par les équations suivantes:

$$EN - EN_s = 0,0020 \times \text{Amidon} - 0,0124 \times \text{CBD} \quad (\text{ETR} = 0,21)$$

$$EN - EN_j = 1,38 + 0,0065 \times \text{MGD} + 0,0018 \times \text{Amidon} \\ - 0,0028 \times \text{MAD} - 0,0079 \times \text{CBD} \quad (\text{ETR} = 0,18)$$

$$EN - EN_{ni} = 0,0013 \times \text{Amidon} - 0,0090 \times \text{CBD} \quad (\text{ETR} = 0,22)$$

La première et la troisième équation signifient que  $EN_s$  et  $EN_{ni}$  sous-estiment la valeur EN des aliments riches en amidon (céréales) et, à l'inverse, surestiment celle des aliments riches en parois végétales (sous-produits, tourteaux). Les effets sont toutefois plus faibles avec l'équation  $EN_{ni}$ . Quant à l'équation  $EN_j$ , qui ne prend en compte que la concentration en EM de l'aliment, elle sous-estime la valeur EN des aliments riches en amidon ou en matières grasses et surestime celle des aliments dont les teneurs en matières azotées et en parois végétales sont élevées. Il en résulte que l'équation  $EN_j$  **ne peut prédire avec suffisamment de précision la teneur en EN des régimes ayant des compositions chimiques extrêmes et surtout de la plupart des matières premières**. Compte tenu de la faible teneur en CBD des aliments (tableau 1), le biais induit par l'application de l'équation  $EN_{ni}$  n'est important, en pratique, qu'avec les régimes ou les matières premières riches en amidon.

### 3.4. Validation des systèmes énergétiques

L'objectif principal de l'essai 4 est l'étude de la relation entre l'apport d'énergie, exprimé selon différents systèmes, et les performances réalisées par le porc en croissance. La validité d'un système peut alors être appréciée par la précision de cette relation, pour un ensemble de régimes très diversifiés (BORGGREVE et al., 1975; PEREZ et al., 1990). Un tel objectif nécessite des mesures précises de la valeur nutritionnelle des régimes et des performances des animaux dans des conditions d'élevage bien contrôlées.

Compte tenu des différences de conditions d'élevage (température ambiante, ...) et de potentiel de croissance des animaux selon les sites expérimentaux, l'effet du site est hautement significatif pour l'ensemble des critères mesurés (tableau 10). À titre indicatif, l'indice de consommation moyen, exprimé en kg de matière sèche par kg de gain de poids, varie selon les sites de 2,19 à 2,87. À l'exception de la quantité de matière sèche ingérée, aucune interaction significative entre le site expérimental et le régime n'a été mise en évidence. L'interaction observée est en fait liée au mode de conduite de l'expérience, l'ajustement des plans d'alimentation par rapport à un plan théorique, pour une vitesse de croissance égalisée entre régimes, n'ayant pas été pratiqué avec la même précision dans tous les sites.

Conformément au protocole de l'essai, la vitesse de croissance et la composition corporelle à l'abattage ne diffèrent pas entre les régimes. Toutefois, l'ajustement des vitesses de croissance entre les 8 régimes a conduit à prendre comme référence de consommation d'énergie le(s) régime(s) ayant la plus faible concentration énergétique. En conséquence, les animaux affectés aux régimes à concentration en énergie moyenne (1 à 4) ou élevée (7 et 8) ont subi un rationnement modéré. Il en est résulté une vitesse de croissance moyenne de l'ensemble des animaux de l'essai qui est très inférieure à celle pouvant être mesurée dans des conditions d'alimentation plus libérales.

Le poids du tube digestif plein, mesuré dans 4 des 6 sites d'expérience, est, quel que soit le site, significativement affecté par la nature du régime; la valeur moyenne la plus élevée est obtenue avec le régime 6 (9,1% du poids vif) et la plus faible avec les régimes 7 et 8 (8,0% du poids vif). Comme l'indiquent les résultats obtenus sur 2 de ces 4 sites et en accord avec les conclusions de PEREZ et al. (1990), les variations du poids du tube digestif plein avec la nature du régime sont à relier aux différences de poids des contenus digestifs, le poids du tube digestif lui-même étant peu affecté (tableau 10). Les variations du poids des contenus digestifs sont à relier au niveau de parois végétales dans l'aliment (NOBLET et al., 1989; PEREZ et al., 1990). Mais la variabilité importante du critère poids des contenus digestifs ne permet pas de mettre en évidence d'effet significatif du régime. Les valeurs moyennes obtenues sur les 2 sites ont toutefois été utilisées pour corriger les résultats de croissance de l'ensemble des essais.

En relation avec les écarts de concentration énergétique entre régimes, il est logique d'observer un effet significatif du régime sur l'indice de consommation, exprimé en termes de matière sèche par unité de gain de poids vif. Comme l'indiquent les résultats du tableau 10, l'effet du régime sur l'indice énergétique varie selon le mode d'estimation de la valeur énergétique de l'aliment: marqué ( $P < 0,01$ ) avec les systèmes ED, EM,  $EN_s$ ,  $EN_{ni2}$  et  $EN_{g2}$ , faible ( $P < 0,05$ ) avec  $EN_{ni1}$  et non significatif

Tableau 10 - Performances de croissance des animaux (n = 522) de l'essai de validation.

Régime	1	2	3	4	5	6	7	8	ETR (4)	Stat. (4)
Poids vif initial, kg	27,4	27,5	27,8	27,8	27,7	27,3	27,4	27,5	2,8	S**
Poids vif final, kg	102,3	102,8	103,4	103,3	103,3	103,2	103,1	103,9	2,4	S** R*
MS ingérée, g/j	1876	1880	1866	1871	1993	1969	1779	1779	68	S** R** RS**
Gain de poids vif, g/j (1)	715	714	736	724	716	712	719	733	53	S**
Contenus digestifs, % (2)	3,05	3,10	2,65	2,60	3,15	3,70	3,00	2,55	0,75	S**
% de muscles FOM	53,6	53,3	53,0	53,5	53,3	53,6	53,7	53,6	3,0	S**
<b>Indices de consommation (/kg de gain) (3)</b>										
Matière sèche, kg	2,66	2,66	2,56	2,61	2,81	2,80	2,51	2,46	0,17	S** R**
ED, MJ	41,3	40,6	41,3	41,3	42,2	41,1	40,2	40,6	2,6	S** R**
EM, MJ	39,6	39,3	39,7	39,8	40,8	39,7	38,8	39,0	2,5	S** R**
EN <sub>1</sub> , MJ	28,0	27,9	27,6	27,7	28,4	28,1	27,5	27,3	1,8	S** R*
EN <sub>2</sub> , MJ	28,7	28,4	28,1	28,6	29,2	28,8	28,2	27,9	1,8	S** R**
EN <sub>4</sub> , MJ	25,5	25,0	25,6	25,6	25,9	25,3	24,9	25,1	1,6	S** R**
EN <sub>11</sub> , MJ	29,7	29,1	29,1	29,7	30,2	29,4	29,1	28,7	1,9	S** R**
EN <sub>g</sub> 2, MJ	29,6	29,2	29,2	29,6	30,1	29,3	29,2	29,1	1,9	S**
EN <sub>g</sub> 4, MJ	29,3	29,1	28,9	29,3	29,6	29,3	29,5	29,3	1,9	S**

(1) Ajusté, entre les régimes, pour un même contenu digestif du gain de poids vif.

(2) À l'abatage, en % du poids vif: moyenne des résultats de 2 sites; données utilisées pour l'ajustement du gain de poids et des indices de consommation pour l'ensemble des essais.

(3) Indices de consommation ajustés intra-site pour les différences de teneur en muscles FOM et entre régimes pour les différences de contenu digestif; voir signification des sigles utilisés au tableau 2.

(4) S pour effet site (n=6), R pour effet régime (n=8) et RS pour l'interaction entre le régime et le site. Niveaux de signification: \*\*: P<0,01; \*: P<0,05. ETR pour écart-type résiduel.

**Tableau 11 - Relation entre l'efficacité alimentaire (gain de poids: matière sèche consommée) ou l'indice énergétique (énergie consommée: gain de poids) et la concentration en énergie de l'aliment, selon le système énergétique (à partir des données du tableau 10) (1).**

	Efficacité alimentaire		Indice énergétique		
	R <sup>2</sup>	CV résiduel	CV	R <sup>2</sup>	CV résiduel
<b>Système énergétique</b>					
ED	0,93	1,4	1,5	0,21 <sup>ns</sup>	1,4
EM	0,94	1,3	1,5	0,35 <sup>ns</sup>	1,3
EN <sub>1</sub>	0,99	0,5	1,3	0,85	0,5
EN <sub>2</sub>	0,98	0,8	1,5	0,74	0,8
EN <sub>4</sub>	0,93	1,4	1,4	0,07 <sup>ns</sup>	1,5
EN <sub>11</sub>	0,94	1,3	1,6	0,35 <sup>ns</sup>	1,4
EN <sub>g</sub> 2	0,96	1,0	1,1	0,18 <sup>ns</sup>	1,1
EN <sub>g</sub> 4	0,97	0,8	0,8	0,01 <sup>ns</sup>	0,9

(1) Sur une ligne (ou pour un système énergétique), les valeurs successives correspondent au coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) et au coefficient de variation résiduel (CV résiduel, en %) de la régression entre l'efficacité alimentaire et la concentration en énergie de l'aliment, au coefficient de variation de l'indice énergétique (CV, en %) et aux R<sup>2</sup> et CV résiduel de la régression entre l'indice énergétique et la concentration en énergie de l'aliment. Le système énergétique est d'autant plus précis que le CV et le CV résiduel de l'indice énergétique sont comparables et faibles et que la valeur de R<sup>2</sup> pour l'indice énergétique est proche de zéro. Voir le tableau 2 pour la signification des sigles utilisés.

avec EN<sub>4</sub> et EN<sub>11</sub>. Ces conclusions sont en accord avec les résultats rapportés dans le tableau 11 et permettent de conclure, dans une première étape, à une supériorité des systèmes énergétiques EN<sub>1</sub>, EN<sub>4</sub> et EN<sub>11</sub> pour la prédiction des performances du porc en croissance. Cependant, dans le cas du système EN<sub>1</sub>, l'indice énergétique est d'autant plus faible que la concentration en énergie de l'aliment est élevée (tableaux 10 et 11); ce résultat peut s'interpréter comme la conséquence d'une sous-estimation de la teneur en énergie des aliments à concentration élevée en énergie (ou surestimation des régimes à faible teneur en énergie) dans le système EN<sub>1</sub>. Enfin, il faut signaler l'intérêt des équations de prédiction de la valeur énergétique de régimes complets, basées sur les résultats de l'analyse chimique (EN<sub>g</sub>11), qui permettent de «classer» de façon très satisfaisante un ensemble de régimes sur la base de leur valeur énergétique «vraie».

La mise en évidence de l'effet de la nature du régime sur l'indice énergétique est facilitée par le nombre élevé d'animaux mis en expérience (65 par régime) et provient pour une grande part du résultat mesuré sur le régime 5, pour lequel l'indice énergétique est systématiquement supérieur, quel que soit le système. En effet, l'exclusion, dans l'analyse de variance globale, des données obtenues sur ce régime ne permet plus de mettre en évidence d'effet régime sur l'indice énergétique, quel que soit son mode d'évaluation.

Les résultats du tableau 10 indiquent que, pour un ensemble de régimes de nature très différente, la différence d'indice énergétique entre les valeurs extrêmes est généralement inférieure à 4% de la valeur moyenne, voire 3% pour les indices exprimés dans les systèmes EN<sub>4</sub> ou EN<sub>11</sub>. Si l'on excepte

les données du régime 5, cet écart est voisin de 2%. Or, l'écart type résiduel de l'estimation des valeurs ED ou EM et, par suite, EN d'un aliment représente de 1,5 à 2% de la valeur moyenne mesurée (tableaux 3 et 4). Il en résulte que **la mesure elle-même de la valeur énergétique du régime représente un facteur limitant essentiel dans la comparaison des systèmes énergétiques**. Par ailleurs, la valeur nutritionnelle d'un aliment varie notamment avec le stade de croissance et le niveau d'alimentation (NOBLET et al., 1993a). La valeur nutritionnelle des 8 régimes de l'essai, même si elle a été déterminée dans 2 situations différentes, peut donc ne pas être représentative de l'utilisation digestive réelle moyenne au cours de l'ensemble de la période expérimentale, pour les 6 sites d'expérience. Enfin, en dehors de sa faible teneur en protéines relativement à l'énergie, il n'existe pas d'explication objective au résultat particulier obtenu avec le régime 5.

En définitive, la comparaison des systèmes énergétiques à partir d'essais de croissance réalisés avec des régimes équilibrés est difficile, compte tenu notamment de la précision insuffisante dans la détermination de la valeur nutritionnelle (digestibilité) des régimes. Une conclusion similaire, mais pour des raisons différentes, était tirée par PEREZ et al. (1990). Un nombre plus élevé de régimes serait de toute façon nécessaire. Les résultats des deux essais tendent toutefois à privilégier les systèmes EN (type EN<sub>4</sub> ou EN<sub>11</sub>). Quoi qu'il en soit, l'intérêt des systèmes EN reste évident pour la prédiction de la valeur énergétique des matières premières et, par voie de conséquence, pour les régimes.

### 3.5. Conséquences pratiques

La valeur énergétique d'un aliment peut être exprimée à partir de ses teneurs en ED, en EM ou en EN avec, pour l'EN, différentes estimations selon l'équation de prédiction utilisée. La valeur EN est fonction des conditions de l'étude de référence et de la destination de l'énergie (croissance vs entretien, notamment).

En premier lieu, il est clair que la hiérarchie ou les écarts relatifs de valeur énergétique entre aliments sont différents dans les systèmes ED, EM et EN. Ainsi, si l'on suppose que la teneur en EN est la meilleure estimation de la valeur énergétique «vraie», les systèmes ED ou EM surestiment la valeur énergétique des aliments riches en matières azotées ou en parois végétales et, à l'inverse, sous-estiment celle des aliments ayant des teneurs élevées en amidon ou en matières grasses. Les conséquences pratiques du choix des systèmes ED ou EM ou EN pour les matières premières (hiérarchie, formulation) ont été décrites de façon plus détaillée par NOBLET et al. (1989 et 1993b). Quoi qu'il en soit, **le système EN conduit à une estimation plus précise de la valeur énergétique d'un aliment que les systèmes ED ou EM**, notamment pour les matières premières. Les écarts entre les différentes estimations de l'EN s'expliquent avant tout par les insuffisances du dispositif expérimental et du mode de fractionnement de la matière organique, comme dans les études de SCHIEMANN et al. (1972) ou de JUST (1982).

Les équations proposées par NOBLET et al. (1989) et celles issues de l'essai 1 (tableau 9) ont été établies à l'aide d'un dispositif expérimental strict et à partir de mesures réalisées sur des régimes. Leur validité, tant au travers des résultats des essais zootechniques que de leur applicabilité à l'estimation de la valeur EN des matières premières (tableau 8; NOBLET et al., 1993b), a été vérifiée. Par ailleurs, la précision des équations

qui prennent en compte les résultats de la digestibilité est satisfaisante.

Les essais 2 et 3 ont permis de tester la validité des équations établies chez le porc en début de croissance, aux autres stades de la croissance et même chez la truie à l'entretien pour les équations basées sur les teneurs en éléments digestibles ou en ED (et quelques caractéristiques chimiques). Ainsi, on peut considérer qu'**en pratique les équations EN<sub>1</sub>, EN<sub>2</sub>, EN<sub>4</sub> ou EN<sub>5</sub> sont applicables à tous les stades de la vie du porc**. Mais les données de la bibliographie mettent clairement en évidence que les teneurs en ED ou en éléments digestibles d'un aliment varient selon l'animal qui le consomme (NOBLET et al., 1993a). En conséquence, **même si une seule équation de prédiction de la valeur EN chez le porc peut être suggérée, la valeur EN d'un même aliment variera avec le stade physiologique, voire le stade de croissance**. En pratique, il sera donc nécessaire d'attribuer plusieurs valeurs ED ou teneurs en éléments digestibles à un même aliment. Toutefois, dans un souci de simplification, **deux stades importants (le porc de 60-70 kg représentatif de l'animal en croissance et, probablement, de la truie en lactation et le porc adulte alimenté de façon restreinte) seraient à considérer lors de l'établissement de tables de valeur nutritionnelle**. Une solution rapide pour éviter les mesures systématiques de digestibilité aux deux stades, consisterait à établir des relations permettant de prédire la digestibilité de régimes ou de matières premières chez le porc adulte à partir des résultats obtenus chez le porc en croissance. Les relations proposées par NOBLET et al. (1993a) représentent une première tentative qui devra être poursuivie.

En l'absence de données fiables sur les variations des coefficients de digestibilité des nutriments ou de l'énergie avec le stade physiologique ou le stade de croissance, la mise en application d'un système EN chez le porc n'est possible que sur la base des données des tables de valeur nutritionnelle (CVB, 1988 ou DLG, 1984 pour les coefficients de digestibilité; INRA, 1984 pour les teneurs en ED; ...). Les données disponibles dans ces tables permettent d'utiliser les équations du tableau 9 (p 245), prenant notamment en compte le critère cellulose brute (EN<sub>2</sub> et EN<sub>4</sub>); la digestibilité de l'amidon peut être supposée égale à 100% (BACHKNUDSEN et HANSEN, 1991).

L'utilisation des équations de prédiction basées sur les données de composition chimique brute a son intérêt pour hiérarchiser des régimes complets, analysés dans des conditions comparables. Elles ne peuvent prédire avec précision la valeur EN de matières premières ayant une composition chimique très différente d'un régime «standard». De la même façon, elles ne sauraient prédire la valeur EN d'un régime aux différents stades de la vie du porc, compte tenu des variations de l'utilisation digestive avec notamment le poids vif et/ou le niveau d'alimentation.

**De façon plus générale, l'étape de la mesure ou de l'estimation de la digestibilité de l'énergie ou des nutriments est obligatoire pour apprécier avec précision la valeur EN d'un aliment chez le porc.**

En dehors de son intérêt pour les besoins de la formulation, l'estimation de la valeur énergétique d'un aliment est nécessaire pour adapter les apports alimentaires aux besoins des animaux. Ces derniers doivent alors être exprimés sur la même base que les aliments, seule la base EN étant d'ailleurs commune à l'aliment et à l'animal. **La définition des besoins du porc en EN peut se raisonner à différents niveaux.**

En premier lieu, les recommandations alimentaires (plan de rationnement pendant la croissance, par exemple), exprimées en quantité d'ED ou d'EM, peuvent être converties en EN en les multipliant respectivement par 0,74 et 0,71 (valeurs moyennes des rapports EN/EM et EN/ED des 61 régimes de l'essai 1: tableau 1, p 237).

Dans une seconde étape, les besoins peuvent être calculés de façon plus analytique (approche factorielle) et basés sur les dépenses pour l'entretien (ou chaleur au jeûne), pour la croissance (contenu énergétique du gain pondéral) ou pour la production de lait (énergie du lait), exprimées en énergie nette. En l'absence de mesures d'EN chez la truie en lactation, il peut être admis que les équations de prédiction de l'EN établies chez le porc en croissance sont applicables à la truie en lactation; les résultats de NOBLET et ETIENNE (1987) et NOBLET et al. (1991) suggèrent toutefois un rendement d'utilisation de l'EM plus faible pour la production de lait que pour la croissance (72 vs 75% pour le même type de régime). Par ailleurs, l'exposition d'animaux à une température inférieure à la thermoneutralité ou l'activité physique se traduisent par une dissipation d'énergie équivalente à l'EM utilisée pour couvrir ces dépenses. Dans ce cas, le besoin d'aliment, exprimé en EN, pour la thermorégulation ou l'activité physique, est en principe égal à la dissipation d'énergie divisée par 0,74 en moyenne (valeur moyenne du rapport EN/EM; tableau 1). Des études complémentaires sont toutefois nécessaires pour préciser ce concept.

Ce deuxième niveau dans le calcul des besoins en EN peut être progressivement mis en place à partir des connaissances disponibles qui ne pourront être efficacement utilisées qu'à l'aide de modèles informatisés.

## CONCLUSION

Les résultats du programme de recherches conduit sur le

thème de l'utilisation métabolique de l'énergie chez le porc permettent de proposer des équations de prédiction de la teneur en EN des aliments qui sont applicables à tous les stades de sa vie, à la fois pour les besoins d'entretien et de croissance. Les données disponibles dans les tables de valeur nutritionnelle nous amènent à recommander les équations EN<sub>2</sub> ou EN<sub>4</sub>. Par ailleurs, ces travaux et les essais zootechniques de validation confirment la supériorité attendue du concept EN sur les concepts ED ou EM, pour apprécier la valeur énergétique des aliments du porc et rendre fiable la relation entre l'apport d'énergie et les performances des animaux. Des biais systématiques ou des imprécisions dans les systèmes EN antérieurement proposés ont été mis en évidence. Enfin, les besoins des animaux peuvent également être exprimés sur une base EN.

Le passage des systèmes ED ou EM au système EN ne doit pas conduire à négliger l'étape de l'utilisation digestive de l'énergie puisque celle-ci est affectée par des facteurs aussi élémentaires que le poids vif des animaux et/ou leur niveau d'alimentation. En fait, contrairement aux concepts communément admis en matière d'évaluation de la teneur en énergie des aliments, les variations de la valeur énergétique d'un aliment donné sont plus associées aux variations de l'utilisation digestive qu'à celles de l'utilisation métabolique. En conséquence, les études de digestibilité conservent un intérêt primordial pour l'estimation de la valeur énergétique des aliments du porc.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les partenaires du Groupement pour l'Encouragement à la Recherche en Nutrition Animale (GERNA) qui ont activement contribué, notamment par leurs suggestions, leur aide financière et leur participation aux dosages de laboratoire, à la réalisation de la plupart des essais dont les résultats sont rapportés dans cette synthèse.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BACHKNUDSEN K.E., HANSEN I., 1991. Br. J. Nutr., 65, 217-232.
- BORGGREVE G.J., VAN KEMPEN G.J.M., CORNELISSEN J.P., GRIMBERGEN A.H.M., 1975. Z. Tierphysiol. Tierernähr. u. Futtermittelkunde, 34:199-204.
- CARRE B., BRILLOUET J.M., 1989. J. Assoc. Off. Anal. Chem., 72:463-467.
- CVB (Central Veevoederbureau), 1986. Veevoedertabel. Gegevens over voederwarde, verteerbaarheid en samenstelling. CVB: Lelystad.
- DLG, 1984. Futterwerttabellen für Schweine. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, 82 pp.
- INRA, 1989. L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles. INRA éd., Paris, 282 p.
- JUST A., 1982. Livest. Prod. Sci., 8, 541-555.
- NOBLET J., ETIENNE M., 1987. J. Anim. Sci., 64, 774-781.
- 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., HENRY Y., 1991. In: E.S. Batterham (Editor), Manipulating Pig Production III. Australasian Pig Science Association, Attwood, pp. 87-110.
- NOBLET J., KAREGE C., DUBOIS S., 1991. In C. Wenk and M. Boessinger (Editors), Energy Metabolism of Farm Animals, ETH, Zurich, pp. 107-110.
- NOBLET J., 1993. Prod. Anim., 6, 105-115.
- NOBLET J., HENRY Y., 1993. Livest. Prod. Sci., 36, 121-141.
- NOBLET J., SHI X.S., 1993. Livest. Prod. Sci., 34, 137-152.
- NOBLET J., SHI X.S., KAREGE C., DUBOIS S., 1993a. Journées Rech. Porcine en France, 25, 97-112.
- NOBLET J., FORTUNE H., DUPIRE C., DUBOIS S., 1993b. Anim. Feed Sci. Technol., 42, 131-149.
- NOBLET J., SHI X.S., DUBOIS S., 1993c. Br. J. Nutr., 70, 407-419.
- NOBLET J., SHI X.S., DUBOIS S., 1993d. Livest. Prod. Sci. 34, 127-136.
- NOBLET J., FORTUNE H., SHI X.S., DUBOIS S., 1994a. J. Anim. Sci. (sous presse).
- NOBLET J., SHI X.S., DUBOIS S., 1994b. J. Anim. Sci. (sous presse).
- PEREZ J.M., HENRY Y., SAUVANT D., JACQUOT L., RICCA V., 1990. Ann. Zootech., 39, 193-218.
- SAS, 1988. SAS User's Guide: Statistics. SAS Inst., Inc., Cary, NC, 1028 p.
- SCHIEMANN R., NEHRING K., HOFFMANN L., JENTSCH W., CHUDY A., 1972. Energetische Futterbeverung und Energiennormen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 344 pp.
- SHI X.S., NOBLET J., 1993a. Livest. Prod. Sci., 34, 237-252.
- SHI X.S., NOBLET J., 1993b. Livest. Prod. Sci. (sous presse).