

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

J. NOBLET, X.S. SHI, C. KAREGE, S. DUBOIS

*Institut National de la Recherche Agronomique
Station de Recherches Porcines, 35590 Saint Gilles*

Avec la collaboration de J.P. PRIGENT et A. ROGER pour les mesures sur animaux, Sylviane BARRÉ et Nadine MÉZIÈRE pour les analyses de laboratoire

Cette synthèse regroupe les résultats de quatre essais ayant pour objet la quantification des effets de facteurs de variation non liés directement à la composition chimique de l'aliment sur le coefficient d'utilisation digestive (CUD) de l'énergie et des principaux nutriments, chez le porc. Dans l'essai 1, l'influence d'une réduction de 25% du niveau d'alimentation est mesurée chez des porcs de 45 kg (2 régimes). Dans l'essai 2, la digestibilité d'un régime a été quantifiée de façon continue entre 20 et 100 kg de poids vif, à la fois chez des mâles, des femelles et des mâles castrés. Pour l'essai 3, 7 régimes constitués à partir d'un régime de base auquel sont ajoutés notamment de l'amidon de maïs ou du saccharose ou de l'huile de colza ou un mélange de matières premières riches en parois végétales sont distribués à des porcs de 45, 100 et 150 kg de poids vif. Enfin, dans l'essai 4, la digestibilité de 14 régimes a été mesurée chez des porcs de 45 kg ayant un niveau d'alimentation élevé et des truies adultes alimentées de façon à couvrir leur besoin énergétique d'entretien. Dans le cas des essais 3 et 4, l'utilisation digestive des matières premières ajoutées (essai 3) ou des 10 matières premières utilisées pour constituer les régimes (essai 4) est calculée à l'aide de la méthode par différence (essai 3) ou par la technique de régression multiple (essai 4). Les 4 essais représentent 360 collectes de fèces et d'urines. Sur la base des résultats de ces essais et des données de la bibliographie, il apparaît que le CUD de l'énergie s'accroît avec l'augmentation du poids vif, la variation relativement à celle du poids vif étant d'autant plus importante que les animaux sont jeunes ou que les régimes sont riches en parois végétales. Les effets d'une variation modérée du niveau d'alimentation sur le CUD de l'énergie sont faibles; seule des modifications drastiques du niveau alimentaire affectent significativement la digestibilité, l'effet étant plus marqué pour les régimes riches en parois végétales. Ces phénomènes d'interaction digestive sont les plus importants dans l'essai 4 où le CUD de l'énergie mesuré chez les porcs en croissance équivaut à 90%, en moyenne, des valeurs obtenues chez la truie; les écarts entre les deux groupes d'animaux sont faibles pour les régimes ou les matières premières pauvres en parois végétales et, par contre, très élevés pour certains régimes et surtout des matières premières comme les issues de céréales ou les pulpes. Les mécanismes impliqués et les conséquences de ces observations sur le mode d'évaluation de la valeur nutritionnelle des aliments pour le porc sont analysés.

Effects of sex, feeding level, body weight and physiological stage on digestive utilization of energy in pigs; interactions with composition of the diet.

In this review, the effects of non dietary factors on the digestibility coefficient (DC) of energy and nutrients in pigs are analysed according to the results of four trials. In trial 1, the effect of a 25% reduction of feed allowance on DC of energy of two diets was measured in 45 kg pigs. In trial 2, the digestive utilization of one diet was continually measured from 20 to 100 kg BW in males, females and castrates. In trial 3, seven diets prepared from a basal diet added with either corn starch or saccharose or rapeseed oil or a mixture of fibrous ingredients were given to 45, 100 and 150 kg BW pigs. In trial 4, DC of energy and nutrients of 14 diets was measured either in 45 kg pigs fed close to their ad libitum level or in adult sows at their maintenance level. For trials 3 and 4, the digestive utilization of ingredients (10 in trial 4) was calculated according to the difference method (trial 3) or the multiple regression technique (trial 4). The four trials involved the collection of 360 samples of feces and urines. According to the results of these trials and literature data, it is clear that increase in BW is associated to an improvement of DC of energy, the variation related to BW being as important as the pigs are young or as the diets have high fibre contents. A moderate variation of feeding level does not affect significantly DC of energy; only severe variations of feeding level have marked effects on DC of energy, the effects being more pronounced for high fibre diets. These digestive interactions were the most important in trial 4 in which the mean DC of energy in growing pigs represented 90% of the value measured with sows. Differences between both groups of pigs were small for highly digestible diets or ingredients and quite important for some diets or ingredients such as wheat by-products or pulps. The involved mechanisms and the consequences of these results on feed evaluation in pigs are analysed.

INTRODUCTION

L'utilisation de l'énergie contenue dans l'aliment s'effectue en plusieurs étapes successives qui conduisent à exprimer la valeur énergétique en termes d'énergie digestible (ED), d'énergie métabolisable (EM) ou d'énergie nette (EN). Les conséquences du mode d'expression sur la hiérarchie entre matières premières ou régimes et les avantages du concept EN ont été largement abordés (NOBLET et al, 1989). Toutefois, la valeur EN, non mesurable directement, est calculée à partir des teneurs en ED, en EM ou en éléments digestibles. Il est donc primordial de connaître avec précision l'utilisation digestive de l'énergie et des différents nutriments d'un aliment (régime ou matière première).

Les teneurs en ED, EM ou en éléments digestibles des aliments peuvent être mesurées directement sur les animaux ou estimées (par additivité pour les régimes) à partir de tables de valeurs alimentaires. Les valeurs ainsi retenues représentent des valeurs moyennes. Or, la digestibilité de l'énergie et des nutriments est sous la dépendance de facteurs liés à l'aliment lui-même (nature et importance des parois végétales, degré d'insaturation des matières grasses, ...) mais également de facteurs dépendant de l'animal. Ainsi, la digestibilité s'accroît avec l'augmentation du poids vif chez le porc en croissance ou lorsque la truie est comparée au porc en croissance ou suite à une réduction du niveau d'alimentation (CUNNINGHAM et al, 1962; ROTH et KIRCHGESSNER, 1984; EVERTS et al, 1986; FERNANDEZ et al, 1986). Toutefois, l'amplitude de la variation a été peu mise en relation avec la nature de l'aliment. Par ailleurs, il est clair que la teneur en ED ou en EM de matières premières riches en parois végétales introduites dans des régimes complexes est inférieure à celle estimée à partir des tables de valeurs alimentaires (NOBLET et al, 1990a). Ces observations suggèrent l'existence d'interactions digestives qu'il est important de prendre en compte si l'on souhaite estimer avec précision la valeur énergétique des aliments pour le porc.

L'objectif des essais dont nous rapportons les résultats concerne la quantification des effets du niveau d'alimentation (essai 1), du poids vif (essais 2 et 3), du type sexuel (essai 2) et du stade physiologique (essai 4) sur l'utilisation digestive de l'énergie. Les trois premiers essais sont réalisés chez le porc en croissance alors que l'essai 4 porte sur la comparaison de truies adultes alimentées de façon restreinte et de porcs en croissance alimentés libéralement. Pour 3 de ces 4 essais, les interactions avec les caractéristiques du régime seront abordées. Il faut enfin signaler que les objectifs de ces essais étaient, pour la plupart d'entre eux, plus larges que ceux qui sont décrits dans cet article. Etaient abordés plus particulièrement les effets de la composition chimique de l'aliment sur l'utilisation métabolique de l'énergie en interaction avec la nature des dépenses (croissance, entretien, dépôt de lipides ou de protéines) et la définition de bases à la modélisation des besoins en énergie du porc en croissance (NOBLET et al, 1991; NOBLET et SHI, 1992; NOBLET et al, 1993; résultats non publiés).

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Dispositifs expérimentaux

1.1.1. Essai 1.

Deux régimes différant par leur teneur en ED et en parois végétales (composition au tableau 1) sont distribués à des porcs dont le poids vif au moment de la collecte était en

moyenne de 42 kg. Chaque régime est distribué à deux niveaux d'alimentation. Le niveau haut (+) est défini à partir de la consommation spontanée des animaux recevant le régime 2. Le niveau bas (B) représente 75% du niveau H. L'apport énergétique quotidien est égalisé entre les deux régimes sur la base de la teneur prévisionnelle en ED. Cinq mâles castrés Large White x Piétrain sont affectés à chacun des 4 traitements expérimentaux.

Tableau 1 - Composition des régimes (essai 1).

Régime	1	2
Composition centésimale, %		
Blé	38,4	23,4
Manioc	15,0	13,0
Mélasses betterave	6,0	5,0
Son de blé		12,8
Corn gluten feed	3,5	10,0
Tourteau de colza	3,0	3,0
Tourteau de soja	15,3	6,9
Tourteau de tournesol		8,0
Pois	15,0	15,0
Carbonate calcium	0,6	1,0
Phosphate bicalcique	1,9	0,4
Sel	0,4	0,6
CMV + acides aminés	0,9	1,2
Composition chimique, % de matière sèche		
Matières minérales	7,3	6,7
Matières azotées totales	19,9	20,5
Matières grasses	1,3	2,0
Cellulose brute	4,8	7,3
NDF	13,4	20,5
ADF	5,8	8,7
ADL	1,0	1,9
Amidon	47,6	40,0
Energie brute, MJ/kg	17,62	18,15

1.1.2. Essai 2

Quarante cinq porcs (15 mâles, 15 mâles castrés et 15 femelles de race Large White) pesant environ 20 kg au moment de la mise en expérience ont reçu jusqu'au poids de 100 kg un même aliment à base de céréales et de soja (tableau 2). Pour les besoins d'un autre protocole, une partie des animaux était abattue aux poids vifs de 40, 60, 80 et 100 kg. Les fèces et les urines de chaque porc ont été collectées à intervalles réguliers (une collecte toutes les 3 semaines) sur l'ensemble de la période expérimentale. En définitive, 141 mesures de digestibilité ont été réalisées, le nombre d'observations étant légèrement plus faible pour les mâles en raison de leur vitesse de croissance plus élevée (tableau 5). Les observations ont été regroupées en 4 classes de poids vif correspondant à des poids vifs moyens de, respectivement, 27, 48, 68 et 86 kg de poids vif. Les porcs étaient alimentés à environ 95% de leur niveau à volonté.

1.1.3. Essai 3

L'objectif de cet essai était de comparer l'utilisation digestive de régimes et de matières premières «modèles» chez des

mâles castrés Piétrain x Large White de 45 (stade 1), 100 (stade 2) et 150 kg (stade 3). Dans ce but, 7 régimes ont été préparés à partir d'un régime de base (R1) contenant des céréales et du tourteau de soja. A une partie de R1, on a substitué de l'amidon de maïs (R2) ou du saccharose (R3) ou un mélange de matières premières riches en fibres (R4) ou une source de matières grasses (huile de colza) (R5) ou l'association des matières premières riches en fibres utilisées pour R4 et de l'huile de colza (R6) ou enfin le mélange isolat de soja + caséine (R7). La composition de R1 et les taux

d'introduction de chacune des matières premières testées sont rapportées au tableau 2. La composition des matières premières est donnée dans le tableau 3. Chaque régime a été distribué aux 3 groupes de porcs (4 animaux par régime; 6 pour R1), en s'efforçant d'égaliser les apports quotidiens d'ED pour les animaux d'un même stade. Cet objectif n'a pu être atteint pour tous les régimes (R4, notamment) chez les porcs du stade 3. Le calcul des teneurs en ED, EM et éléments digestibles des matières premières est réalisé à l'aide de la méthode par différence.

Tableau 2 - Composition des régimes (essais 2, 3 et 4).

	Essai 2	Essai 3 (1)	Essai 4 (n=14) (2)		
			Moyenne	Mini	Maxi
Composition centésimale, %					
Blé	22,0	25,0	16,5	0	31,3
Orge	23,5	25,0			
Mais	22,0	23,0			
Tourteau de soja	22,0	22,6	22,4	10,2	35,6
Amidon de maïs		++	14,5	0	29,2
Saccharose		++			
Mélasse de canne	3,0		1,7	0	4,7
Huile de colza		++	4,5	0	7,8
Farine de viande			2,1	0	7,9
Son de blé	3,0	++	6,2	0	17,8
Remoulage de blé			11,6	0	28,0
Corn gluten feed			6,3	0	13,4
Pulpe de betterave		++	4,7	0	11,8
Coques de soja		++			
Paille de blé		++	3,7	0	11,2
Phosphate bicalcique	2,3	1,7	2,0	2,0	2,0
Carbonate de calcium	1,2	1,7	2,0	2,0	2,0
Sel marin	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Vitamines + oligoéléments	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Composition chimique, % de matière sèche					
Matières minérales	6,8	6,7	9,2	7,9	10,8
Matières azotées	21,2	20,6	20,4	15,9	27,4
Matières grasses	2,3	2,4	6,4	1,6	10,1
Cellulose brute	3,6	4,0	6,4	3,7	9,2
NDF	11,4	12,8	19,3	11,8	26,1
ADF	4,2	4,5	7,6	4,5	11,0
ADL	0,7	0,7	1,3	0,8	1,8
Amidon	-	50,3	35,5	23,0	46,2
Sucres totaux	-	4,4	5,6	3,4	8,1
Énergie brute, MJ/kg	18,15	18,05	18,51	17,47	19,23

- (1) Composition du régime de base (R1) auquel ont été ajoutés (++) de l'amidon de maïs (30%; R2), du saccharose (20%; R3), un mélange de matières premières riches en fibres (7.5% de son de blé + 7.5% de coques de soja + 7.5% de pulpe de betterave + 7.5% de paille de blé) (R4), de l'huile de colza (8%; R5) et l'association son de blé (7.5%) + coques de soja (7.5%) + pulpe de betterave (7.5%) + paille de blé (7.5%) + huile de colza (8%) (R6).
- (2) Voir composition chimique des 14 régimes en annexe 2.

1.1.4. Essai 4

Quatorze régimes dont la composition est rapportée en annexe 2 (composition moyenne au tableau 2) ont été distribués

soit à des mâles castrés Piétrain x Large White pesant en moyenne 43 kg au moment de la collecte des excréta, à raison d'environ 2 MJ d'EM par kg^{0,60}, soit à des truies Large White adultes et castrées (PV moyen: 208 kg), alimentées de façon à

Tableau 3 - Composition chimique (% de MS) et teneur en énergie brute (MJ/kg MS) des matières premières étudiées (1).

	MM	MAT	MG	CB	NDF	ADF	ADL	Amidon	Sucres	EB
Essai 3										
Amidon de maïs	0,5	0,2						98,5		17,27
Saccharose									100,0	16,50
Fibres	7,1	11,2	2,2	27,6	57,7	32,8	3,5	9,6	4,8	17,95
Huile de colza			100,0							39,26
Essai 4										
Blé	2,0	13,1	1,7	2,7	12,9	3,3	0,9	66,8	2,4	18,44
Amidon maïs	0,5	0,2		0,2				98,5		17,27
Mélasse de canne	10,9								53,7	16,47
Tourteau de soja	6,9	52,0	1,7	7,1	14,8	8,3	0,5	6,5	9,6	19,84
Corn gluten feed	6,9	22,4	2,9	7,2	35,0	8,5	1,0	27,7	0,9	18,79
Farine de viande	28,1	56,4	11,7	1,9						18,46
Huile de colza			100,0							38,83
Remoulage de blé	4,0	16,5	4,2	5,8	25,2	7,2	2,0	43,3	6,7	19,00
Son de blé	5,5	17,3	4,3	9,2	41,8	12,0	3,3	25,0	6,8	19,22
Pulpe de betterave	9,6	11,3	1,4	17,7	43,4	21,2	2,9	14,4	4,8	17,00
Paille de blé	7,7	2,8	1,0	44,2	78,0	51,7	7,3	1,8	0,4	17,95

(1) MM, MAT, MG, CB et EB pour matières minérales, matières azotées totales, matières grasses, cellulose brute et énergie brute.

couvrir leur besoin énergétique d'entretien (400 kJ EM/kg^{0,60}). Chaque régime est distribué à 4 porcs en croissance alors que chacune des 6 truies affectées à l'expérience a reçu successivement 8 à 10 régimes, de sorte que chaque régime soit mesuré sur 4 animaux différents. Les régimes ont été formulés afin d'obtenir une large variation de leurs caractéristiques chimiques (tableau 2) et de rendre aussi indépendants que possible les taux d'introduction de chaque matière première, de façon à calculer leur teneur en énergie et en éléments digestibles. Le calcul de la valeur nutritionnelle des matières premières était effectué selon la méthode par régression (NOBLET et al, 1990a).

1.2. Mesures et analyses

La collecte des fèces et des urines a été réalisée sur des animaux maintenus en cage de digestibilité, à l'issue d'une période d'adaptation à la cage et au régime d'au moins 10 jours (15 jours pour les truies de l'essai 4). La durée de la collecte a varié selon les essais de 7 à 10 jours. La production de méthane a été quantifiée dans les essais 3 et 4. La digestibilité iléale de l'énergie et des nutriments des régimes a également été mesurée dans les essais 3 et 4 selon la méthode décrite par NOBLET et al (1990b). Les résultats concernant cet aspect seront abordés brièvement dans la partie discussion.

Pour chacune des 360 collectes réalisées au cours des 4 essais, les porcs ont été pesés au début et à la fin de la période de collecte. Les fèces et les urines sont recueillies quotidiennement, conservées à +4°C et pesées et homogénéisées à la fin de la période expérimentale. Deux échantillons de fèces sont constitués, l'un servant à la détermination de la matière sèche excrétée et l'autre étant lyophilisé pour les analyses de laboratoire. La teneur en matière sèche de l'aliment ingéré est également déterminée.

Les analyses réalisées sur les régimes, les matières premières,

les fèces et les urines sont identiques à celles décrites par NOBLET et al (1989). Les échantillons de régimes ont été analysés par au moins deux laboratoires (quatre pour les essais 3 et 4) et les fèces et les urines par un seul laboratoire. Pour les fèces de l'essai 2, seules les teneurs en énergie et en matières azotées ont été déterminées.

1.3. Calculs et analyses statistiques.

Les coefficients d'utilisation digestive (CUD) des différents éléments nutritifs ainsi que les teneurs en ED et EM ont été calculés par les méthodes habituelles. Selon les essais, la teneur en EM prend (essais 3 et 4) ou ne prend pas (essais 1 et 2) en compte les pertes d'énergie sous forme de méthane.

Dans chaque essai, les données individuelles ont été traitées par analyse de variance avec prise en compte des effets principaux (essai 1: régime et niveau alimentaire; essai 2: sexe et stade; essai 3: régime et stade de croissance; essai 4: régime et stade physiologique) et des effets d'interaction. Dans le cas particulier de l'essai 4, des équations de régression ont été calculées de façon à établir des relations entre la valeur nutritionnelle déterminée chez la truie et celle mesurée chez l'animal en croissance (ou vice versa). Dans le cas de cet essai et pour chaque stade physiologique, des équations de régression entre la valeur nutritionnelle du régime (teneur en ED, par exemple) et les taux d'introduction des matières premières ont été calculées; le coefficient affecté à chaque matière première correspond à sa valeur nutritionnelle (teneur en ED, par exemple). Des informations complémentaires sur cette méthode de calcul de la valeur nutritionnelle de matières premières lorsqu'elles sont incorporées dans des régimes complets sont rapportées par NOBLET et al (1990a). Les analyses statistiques ont été réalisées à partir du logiciel SAS (1988). Enfin, dans le cas de l'essai 3, la valeur nutritionnelle des matières premières se substituant à une partie de R1 a été calculée grâce à la méthode par différence.

2. RÉSULTATS.

2.1. Essai 1 (tableau 4).

Conformément aux caractéristiques de composition chimique, les CUD de l'énergie et des matières azotées sont supérieurs pour le régime 1. De même, en relation avec leur nature, la digestibilité des parois végétales (NDF) est inférieure pour le régime 2. A l'inverse, le CUD des matières grasses est plus faible pour le régime 1. Toutefois, ce dernier résultat a une

signification limitée compte tenu de leur très faible taux dans les deux régimes.

La réduction du niveau d'alimentation se traduit par une amélioration de la digestibilité de l'énergie mais uniquement pour le régime le plus riche en parois végétales. Il en résulte que les teneurs en ED ou en EM ne sont pas affectées par le niveau d'alimentation dans le cas du régime 1 alors que la valeur énergétique est améliorée d'environ 2% par l'abaissement du niveau alimentaire pour le régime 2.

Tableau 4 - Influence du niveau d'alimentation sur l'utilisation digestive et les teneurs en ED et EM de deux régimes (essai 1).

Régime	1		2		Écart-type	Signification Statistique (1)
	H	B	H	B		
Niveau d'alimentation						
Poids vif moyen, kg	43,0	39,7	43,8	40,5	1,8	N**
MS ingérée, g/j	1404	1044	1552	1168		
Coefficients de digestibilité, %						
Énergie	85,9	85,6	79,3	80,8	0,8	R**; RxN*
Azote	82,8	83,5	79,3	80,8	1,5	R**
Matières grasses	30,3	43,3	54,8	48,3	5,9	R**
NDF	61,0	58,8	51,4	54,3	3,6	R**
Valeurs énergétiques, MJ/kg MS						
ED	15,14	15,08	14,39	14,66	0,14	R**; RxN*
EM	14,54	14,48	13,77	14,08	0,14	R**; RxN**

(1) Signification statistique: R: effet régime; N: effet niveau d'alimentation; RxN: interaction entre le régime et le niveau d'alimentation; niveaux de signification: **: P<0,01; *: P<0,05.

2.2. Essai 2 (tableau 5).

L'augmentation du poids vif des animaux se traduit par un accroissement curvilineaire du CUD de l'énergie, la variation étant la plus importante entre 27 et 47 kg de poids vif (+1,5 point contre 0,5 point pour les stades suivants). En supposant que l'accroissement du CUD de l'énergie avec le poids vif au delà de 86 kg est comparable à ce qui est observé entre 47 et 86 kg, la variation du CUD de l'énergie entre 27 et 100 kg est voisine de 3 points. Cet écart équivaut à environ 550 KJ par kg de matière sèche, soit environ 70 KJ pour une augmentation de

10 kg du poids vif. Pour les animaux les plus lourds (47 à 86 kg), la variation est équivalente à environ 50 KJ pour chaque augmentation de 10 kg du poids vif. Comme pour l'énergie, le CUD des matières azotées s'accroît curvilineairement avec le poids vif, l'augmentation entre 27 et 100 kg étant voisine de 6 points. Si l'on considère que les matières azotées contribuent pour environ 28 % à l'apport d'énergie brute (tableau 2), l'amélioration du CUD des matières azotées entre 27 et 100 kg se traduit par une augmentation d'environ 300 KJ de la teneur en ED du régime. Cet accroissement représente plus de la moitié de l'augmentation de la teneur en ED qui est observée.

Tableau 5 - Influence du poids vif et du type sexuel sur l'utilisation digestive de l'énergie et des matières azotées chez le porc en croissance (essai 2; n=141 observations).

	Période				Sexe (1)			Écart-type	Signification Statistique(1)
	1	2	3	4	M	F	MC		
Observations (n)	48	44	25	24	42	50	49		
PV moyen, kg	27,3 ^a	47,6 ^b	68,3 ^c	86,2 ^d	59,8 ^c	54,9 ^a	57,3 ^b	4,1	P**;S**
MS ingérée, g/j	1128 ^a	1776 ^b	2150 ^c	2263 ^d	1856 ^b	1716 ^a	1915 ^b	164	P**;S**
Coefficients de digestibilité, %									
Énergie	83,8 ^a	85,4 ^b	86,0 ^{bc}	86,5 ^c	85,0 ^a	86,3 ^b	85,1 ^a	1,7	P**;S**
Azote	81,7 ^a	84,5 ^b	86,4 ^c	87,3 ^c	84,9	85,6	84,8	2,8	P**
EM/ED, %	95,6 ^{ab}	95,8 ^a	95,4 ^{bc}	95,2 ^c	95,7 ^a	95,4 ^b	95,4 ^b	0,5	P**;S*
Azote fixé, g/j	16,9	25,5	25,2	22,9	26,4	21,1	20,4	2,6	P**;S**;PxS*

(1) M, F et MC pour, respectivement, mâles, femelles et mâles castrés. P: effet période; S: effet sexe. Niveaux de signification: **: P<0,01; *: P<0,05. Pour chaque effet principal, les valeurs suivies d'une même lettre ne diffèrent pas significativement (P>0,05).

A l'inverse, l'accroissement du poids vif (notamment au delà de 47 kg) entraîne une diminution du rapport EM/ED, ce qui a pour conséquence d'atténuer l'amélioration de la valeur énergétique du régime observée lorsque le critère teneur en ED est considéré. Ainsi, l'amélioration de la teneur en EM de l'aliment entre 47 et 86 kg de poids vif représente environ la moitié de l'augmentation correspondante de la teneur en ED. La variation du rapport EM/ED est à rapprocher de celle de la quantité d'azote excrétée dans les urines.

La comparaison des trois types sexuels met en évidence une digestibilité supérieure de l'énergie et des matières azotées chez les femelles alors que les mâles et les mâles castrés ne diffèrent pas significativement. En relation avec une rétention azotée supérieure, le rapport EM/ED est significativement plus élevé chez les mâles.

2.3. Essai 3

Comme pour l'essai 2, l'accroissement du poids vif des animaux se traduit par une augmentation de l'utilisation digestive de l'énergie des sept régimes étudiés. De plus, la variation est

plus importante entre le stade 1 (45 kg) et le stade 2 (100 kg) qu'entre le stade 2 et le stade 3 (150 kg) (tableau 6). Toutefois, l'amélioration du CUD de l'énergie avec le poids des animaux est variable selon la nature du régime (annexe 1). Ainsi, l'augmentation est particulièrement importante pour le régime riche en parois végétales (R4) (+ six points entre 45 et 150 kg), celle-ci se poursuivant au-delà de 100 kg. A l'inverse, pour les régimes enrichis en amidon ou en matières grasses (respectivement R2 et R5), la variation est plus faible (+ deux points) et se produit essentiellement entre 45 et 100 kg. L'amélioration du CUD de l'énergie avec le poids des animaux est associée à un accroissement de l'utilisation digestive de tous les constituants chimiques (tableau 6). Toutefois, les CUD des matières azotées et des matières grasses ne diffèrent pas pour les deux groupes de porcs les plus lourds. En conséquence, l'amélioration du CUD de l'énergie entre 100 et 150 kg est associée à une meilleure utilisation digestive des parois végétales (NDF) et des autres constituants chimiques non dosés (glucides). L'amélioration du CUD de l'énergie avec le poids des animaux a pour conséquence une teneur en ED des régimes qui s'accroît significativement avec le poids vif des porcs. Toutefois, cette augmentation n'est pas significative lorsque le régime est particulièrement riche en amidon (R2) (annexe 1).

Tableau 6 - Influence du poids vif sur l'utilisation digestive de l'énergie et des nutriments (essai 3; moyenne de 7 régimes).

Stade	1	2	3	Écart-type	Signification Statistique (1)
Poids vif, kg	44,2 ^a	103,2 ^b	149,2 ^c	7,1	S**
MS ingérée, g/j	1413 ^a	2298 ^b	2560 ^c	219	R**;S**
Coefficients de digestibilité, %					
Énergie	83,2 ^a	85,5 ^b	86,3 ^c	1,1	R**;S**;RxS*
Azote	81,2 ^a	85,1 ^b	85,8 ^b	2,0	R**;S**
Matières grasses	56,4 ^a	65,6 ^b	64,8 ^b	5,3	R**;S**;RxS*
NDF	53,3 ^a	57,8 ^b	61,2 ^c	4,1	R**;S**
EM/ED, %	97,2 ^a	95,3 ^b	94,9 ^c	0,5	R**;S**;RxS**
E. CH4, %ED	0,51 ^a	0,68 ^{ab}	0,83 ^b	0,27	R**;S**
ED, MJ/kg MS	15,48 ^a	15,90 ^b	16,06 ^c	0,20	R**;S**;RxS*
EM, MJ/kg MS	15,05 ^a	15,15 ^{ab}	15,24 ^b	0,19	R**;S**; RxS**
Bilan azoté, g/j					
Ingéré	43,4	70,7	78,1	7,4	R**;S**
Fixé	20,4	24,0	21,3	4,4	S**

(1) Signification statistique: R: effet régime (n=7); S: effet stade (n=3); RxS: interaction régime x stade. Niveaux de signification: **; P<0,01; *; P<0,05.

En raison de pertes d'énergie sous forme de méthane et dans les urines (en % de ED) plus importantes chez les animaux lourds, l'augmentation du poids vif des animaux entraîne une diminution du rapport EM/ED. Aussi, en moyenne, les teneurs en EM des sept régimes ne diffèrent significativement qu'entre les deux stades extrêmes (tableau 6). Par contre, pour les régimes riches en parois végétales (R4 et R6), les teneurs en EM sont significativement affectées par le stade (annexe 1). Il faut aussi noter que la production de méthane augmente régulièrement entre stades successifs, les valeurs les plus élevées étant observées avec les régimes riches en parois végétales (R4 et R6). Toutefois, pour ces deux régimes, l'accroissement de l'utilisation digestive des parois végétales (+20% entre les stades 1 et 3 pour le NDF) ne rend que partiellement

compte de l'augmentation correspondante de la production de méthane (+100%). La faible relation entre la production de méthane et l'intensité de la dégradation des parois végétales est également confirmée avec le régime 6 (association de fibres et de matières grasses) pour lequel l'énergie perdue sous forme de méthane est élevée chez les porcs du stade 1 (0,86% de ED contre 0,40% pour R4) sans que les parois végétales (NDF) de R6 soient apparemment mieux dégradées que celles de R4.

La formulation des régimes 2 à 6 avait avant tout comme objectif de calculer l'utilisation digestive (par différence avec R1) de matières premières «modèles» (intitulées amidon, sucre, huile et fibres pour respectivement l'amidon de maïs, le

saccharose, l'huile de colza et le mélange de matières premières riches en parois végétales) aux trois stades de croissance étudiés. Les résultats concernant les coefficients de digestibilité sont rapportés au tableau 7. Les teneurs en éléments digestibles ou en ED ou EM de chaque matière première peuvent être calculées en combinant les données de composition chimique (tableau 3) et les coefficients de digestibilité (tableau 7). Comme pour les régimes, l'utilisation digestive de l'énergie s'accroît avec le poids vif des animaux, l'augmentation étant nulle pour l'amidon et la plus élevée (+40% entre les stades 1 et 3) pour le mélange de matières premières riches en fibres. Par ailleurs, le CUD de l'énergie de l'amidon de maïs est voisin de 100% alors que, pour l'huile de colza, il passe de 90% au stade 1 à 96-97% aux deux autres stades. Il est à noter que pour cette

dernière matière première, le CUD des matières grasses est légèrement inférieur à celui de l'énergie. L'utilisation digestive apparente de l'énergie du saccharose s'accroît avec le poids des animaux pour être voisine de 100% chez les porcs de 150 kg. Si l'on suppose que les parois végétales contribuent pour environ 65% à l'apport d'énergie brute dans le mélange de matières premières riches en fibres (teneur en PAR égale à 62% et 18,8 KJ/g de PAR ; NOBLET et al, 1989), l'amélioration de la digestibilité des parois végétales entre 45 et 150 kg (environ + 15 points) explique un peu plus de la moitié de l'amélioration de la digestibilité de l'énergie des fibres. L'augmentation de la digestibilité apparente des matières azotées des fibres contribue également à l'augmentation du CUD de l'énergie.

Tableau 7 - Influence du stade de croissance sur l'utilisation digestive de l'énergie et des nutriments de quelques matières premières (essai 3)
(voir poids vifs correspondant aux 3 stades: tableau 6 et annexe 1) (1)

	R1	Amidon	Sucre	Huile	Fibres	Huile + Fibres	
						mesuré	calculé (2)
CUD énergie, %							
Stade 1	85	103	94	89	40	62	59
Stade 2	87	102	97	96	49	65	68
Stade 3	87	104	102	97	57	66	73
EM/ED, %							
Stade 1	97	97	97	97	95	96	96
Stade 2	95	98	96	98	95	96	96
Stade 3	95	98	96	97	91	96	94
CUD azote, %							
Stade 1	84				10	32	10
Stade 2	88				25	38	25
Stade 3	87				35	44	35
CUD NDF, %							
Stade 1	54				44	48	44
Stade 2	54				54	55	54
Stade 3	56				60	58	60
CUD matières grasses, %							
Stade 1	54			87		80	87
Stade 2	60			91		79	91
Stade 3	62			90		77	90
Énergie sous forme de méthane, % de ED							
Stade 1	0.4	0.8			0.2	1.6	0.1
Stade 2	0.6	0.6			2.5	1.7	1.5
Stade 3	0.8	0.3			2.8	1.7	1.8

(1) Amidon, sucre, huile et fibres pour, respectivement, l'amidon de maïs, le saccharose, l'huile de colza et le mélange de matières premières riches en fibres.

(2) Valeurs calculées par additivité des résultats obtenus d'une part pour le mélange de fibres (à partir de R4) et d'autre part pour l'huile de colza (à partir de R5) et pondérées en fonction du taux d'introduction.

La production de méthane calculée par différence avec le régime témoin n'est significative que pour l'amidon et le mélange de fibres (tableau 7). Mais alors qu'elle s'accroît très nettement avec le poids vif dans le cas des fibres pour représenter 3% de la teneur en ED chez les porcs du stade 3, elle diminue pour l'amidon de maïs.

Le régime 6 constitué à partir de R1 et de l'addition d'huile de

colza et de fibres avait notamment pour objectif de vérifier l'hypothèse d'additivité de la valeur nutritionnelle des trois constituants. Pour ce qui concerne l'énergie digestible, l'écart entre la valeur mesurée pour R6 et celle calculée par additivité (à partir des résultats de R1, R4 et R5) est faible (tableau 7). Un tel résultat met en évidence l'absence de phénomènes d'interaction digestive entre matières premières. Toutefois, parmi les constituants chimiques, l'utilisation digestive appa-

rente des matières grasses de R6 est inférieure à celle des matières grasses de l'huile de colza incorporée seule (R4), l'écart étant d'autant plus important que les porcs sont lourds. À l'inverse, l'utilisation digestive des matières azotées du mélange de fibres semble améliorée en présence d'huile de colza. Enfin, en accord avec ce qui est observé sur les régimes (R6), la production de méthane semble particulièrement stimulée lors de l'association de parois végétales et de matières grasses chez les porcs de 45 kg (tableau 7).

2.4. Essai 4

En accord avec les résultats des essais 1, 2 et 3, l'utilisation digestive de l'énergie ou des différents nutriments est significativement supérieure chez les truies (tableau 8). Mais

l'amplitude de l'écart entre les deux groupes d'animaux est nettement plus marquée que, par exemple, entre les deux stades extrêmes de l'essai 3. Ainsi, le CUD de l'énergie mesuré pour les porcs en croissance représente en moyenne 90% de la valeur mesurée chez les truies (contre 96% pour l'essai 3). Toutefois, la différence entre les deux groupes de porcs varie selon la nature du régime (annexe 2). On peut ainsi calculer, à partir de la relation liant le CUD de l'énergie à la teneur en NDF du régime (tableau 11), que l'utilisation digestive de l'énergie du régime est comparable pour les deux groupes de porcs lorsque la teneur en NDF est très faible (5%) alors que l'écart représente 15% de la valeur mesurée chez la truie pour une teneur en NDF de 25%. Par ailleurs, ces relations mettent en évidence que l'effet dépressif du NDF sur le CUD de l'énergie est plus important chez le porc en croissance que chez la truie.

Tableau 8 - Utilisation digestive comparée de 14 régimes chez la truie adulte alimentée au niveau de l'entretien et le porc en croissance alimenté libéralement.

	Moyenne (1)		Croissance, % truies		Écart-type (1)
	Truies	Croissance	Moyenne	Étendue	
Poids vif moyen, kg ^b	208	43			4
Matière sèche ingérée, g/d ^{ab}	1485	1373			101
EM ingérée, MJ/d ^b	21,46	18,57			1,71
Coefficients de digestibilité, %					
Matière organique ^{abc}	86,6	78,4	90,5	86-96	1,5
Matières azotées ^{abc}	85,2	74,8	87,7	80-94	2,0
Matières grasses ^{abc}	69,1	55,5	78,8	58-98	4,8
Cellulose brute ^{ab}	64,0	37,5	58,1	46-73	5,8
NDF ^{abc}	70,9	50,2	70,7	59-85	3,7
ADF ^{ab}	60,4	35,0	57,5	45-71	5,8
Énergie ^{abc}	84,7	75,8	89,4	83-96	1,7
EM/ED, %^{ab}	92,3	96,5	104,5	103-106	1,0
EM, % de énergie brute ^{abc}	78,2	73,2	93,4	88-100	3,8
Énergie CH ₄ , % de ED ^{abc}	1,34	0,44	30,3	15-52	0,18
Énergie urine, % de ED ^{ab}	6,35	3,11	43,2	33-58	0,99
Valeurs énergétiques, MJ/kg matière sèche					
ED ^{abc}	15,62	13,96	89,4	83-96	0,32
EM ^{abc}	14,43	13,49	93,4	88-100	0,35
Bilan azoté, g/j					
Ingéré ^{ab}	48,6	44,9			3,3
Fixé ^b	2,1	18,1			3,6

(1) À partir de l'analyse de variance: a, b et c signifient que, respectivement, les effets régime (n=14), stade physiologique (n=2) et l'interaction régime x stade physiologique sont significatifs (P<0,05) (4 observations pour chaque traitement).

À l'inverse de l'utilisation digestive, le rapport EM/ED est significativement plus faible chez la truie (tableau 8), de sorte que l'écart de valeur énergétique moyenne des régimes entre les deux groupes sur la base de la teneur en ED est atténué lorsque le critère teneur en EM est considéré. Ainsi, la teneur en EM mesurée chez le porc en croissance représente en moyenne 93% de celle obtenue pour la truie, contre 89% pour l'ED. Cette différence entre les deux groupes est associée à des pertes d'énergie plus importantes sous forme de méthane (1,3 vs 0,4% de l'ED) et dans les urines (6,3 vs 3,1% de l'ED) chez la

truie. Le résultat concernant les urines est à rapprocher du fait que la totalité des protéines absorbées par la truie est excrétée dans les urines. Ce phénomène est particulièrement accentué dans nos conditions expérimentales puisque les truies reçoivent des régimes dont la teneur en matières azotées est très supérieure à leurs besoins. À partir des équations 3 et 4 (tableau 11), on peut calculer que pour des teneurs en matières azotées de respectivement 10 et 20% chez la truie et le porc en croissance, le rapport EM/ED serait de 94,4 et 96,6 pour les deux groupes correspondants. La perte d'énergie sous forme

de méthane plus élevée chez la truie explique une partie de cet écart.

La conception des régimes de l'essai 4 permettait non seulement d'étudier les effets d'interaction entre la composition des régimes et le stade physiologique sur leur utilisation digestive mais également de calculer la digestibilité de l'énergie et des nutriments des matières premières incorporées dans les régimes. Les résultats concernant le CUD de l'énergie et le rapport EM/ED et les valeurs ED et EM des matières premières sont rapportés au tableau 9. En raison de son faible taux d'incorporation, il n'a pas été possible de calculer la valeur énergétique de la mélasse de canne; celle-ci a été estimée à partir des données rapportées dans des tables de valeur nutritionnelle (INRA, 1984).

En accord avec les conclusions établies pour les régimes, l'utilisation digestive de l'énergie est strictement comparable

chez la truie et le porc en croissance pour le blé et l'amidon de maïs. Par contre, les matières premières riches en parois végétales sont mieux utilisées chez la truie, l'écart relatif avec le porc en croissance étant d'autant plus important que la teneur en parois végétales est élevée. Ainsi, relativement au CUD de l'énergie mesuré chez la truie, celui obtenu pour le porc en croissance représente 94, 88, 81, 72 et 61% pour, respectivement, le tourteau de soja, le remoulage de blé, le son de blé, le corn gluten feed et la pulpe de betterave. Pour une matière première extrême comme la paille de blé, la valeur ED est légèrement positive chez la truie et «négative» chez le porc en croissance. Pour ce qui concerne les matières premières riches en matières grasses, le CUD de l'énergie est également supérieur chez la truie (88 vs 76% pour l'huile de colza). Enfin, l'utilisation digestive de l'énergie de la farine de viande est également meilleure chez la truie, la précision du résultat pour cette matière première étant limitée par son faible taux d'introduction dans les régimes.

Tableau 9 - Coefficients de digestibilité de l'énergie (CUDe, %), rapports EM/ED (%) et teneurs en ED et EM (MJ/kg MS) de 10 matières premières chez la truie (t) et le porc en croissance (c) (essai 4).

Matière première	CUDe.t	CUDe.c	EM/ED.t	EM/ED.c	ED.t	ED.c	EDtables (t)	EM.t	EM.c
Blé	92,4	92,4	95,5	95,5	17,0	17,0	16,1	16,3	16,3
Amidon de maïs	96,0	96,0	100,0	100,0	16,6	16,6	17,1	16,6	16,6
Tourteau de soja	91,2	85,7	86,9	93,1	18,1	17,0	16,6	15,9	15,6
Corn gluten feed	92,8	66,5	89,3	92,3	17,4	12,5	12,1	15,5	11,7
Farine de viande	77,4	49,0	88,8	99,0	14,3	9,1	13,5	12,6	9,08
Huile de colza	88,4	75,8	94,8	96,5	34,3	29,4	35,9	32,7	28,1
Remoulage de blé	78,1	68,4	94,7	98,0	14,8	13,0	14,2	14,0	13,6
Son de blé	68,1	55,5	93,3	97,3	13,1	10,6	12,0	12,3	10,3
Pulpe de betterave	67,3	41,1	78,6	98,0	11,4	7,0	10,7	9,1	6,7
Paille de blé	15,3	-17,8	70,3		2,8	-3,2	0	1,9	-2,6

(1) À partir de INRA (1984).

Le rapport EM/ED est très variable selon les matières premières, les valeurs étant systématiquement supérieures pour le porc en croissance. Les résultats faibles (inférieurs à 90%) calculés pour la truie sont à associer à des pertes d'énergie dans l'urine importantes mais également une production élevée de méthane. On peut ainsi calculer (par une méthode de régression) que l'énergie perdue sous forme de méthane représente 5, 3 et 2% de la teneur en ED pour, respectivement, la pulpe de betterave, le tourteau de soja et le corn gluten feed. Compte tenu de la teneur en ED faible, voire négative, de la paille de blé, le rapport EM/ED pour cette matière première a une signification limitée. Enfin, comme pour les régimes, les écarts de valeur énergétique des matières premières entre la truie et le porc en croissance sont plus faibles sur la base de leur teneur en EM que de la valeur ED. Les écarts demeurent toutefois importants pour les matières premières riches en parois végétales et l'huile de colza (tableau 9).

3. DISCUSSION

Il était admis que l'utilisation digestive de l'énergie et des nutriments d'un aliment pour le porc était avant tout fonction de ses caractéristiques chimiques. Toutefois, les résultats des quatre essais mettent en évidence l'existence de facteurs de

variation de l'utilisation digestive de l'énergie et des nutriments non liés directement à la composition de l'aliment et qui interagissent avec certaines de ses caractéristiques chimiques. La discussion sera présentée de façon à passer en revue les effets de ces principaux facteurs.

3.1. Considérations méthodologiques

La détermination de la teneur en ED ou EM d'un aliment ou plus généralement de sa valeur nutritionnelle, peut être réalisée soit en donnant cet aliment seul, soit en l'additionnant à un régime de base. Dans le premier cas, le calcul de la valeur nutritionnelle est réalisé directement en supposant que le complément minéral et vitaminique (CMV) qui y est généralement adjoint a une contribution nulle. Cette méthode est notamment utilisée pour les céréales. Dans le deuxième cas, la valeur nutritionnelle de l'aliment testé est calculée, soit par différence en supposant que celle du régime de base n'est pas modifiée par l'addition de l'aliment testé, soit par régression (simple ou multiple) à la condition que le dispositif expérimental soit approprié. La comparaison des résultats de nos essais montre que l'approche utilisée n'est pas sans conséquence sur le résultat. Ainsi, pour une matière première particulièrement bien définie comme l'huile de colza, le CUD de l'énergie chez le porc de 45 kg est voisin de 76% avec la méthode par régression multiple (essai 4)

alors que la méthode par différence conduit à une estimation supérieure (89%, essai 3). Ce dernier résultat est d'ailleurs conforme aux estimations de la bibliographie concernant les sources de matières grasses les plus courantes (WISEMAN et al, 1990), ces données étant également obtenues par différence. La valeur de 76% est quant à elle proche de celle rapportée par NOBLET et al (1990a) pour un mélange de graisses animales, ce résultat ayant été obtenu par régression linéaire multiple. Le même raisonnement peut être fait pour l'amidon de maïs (essais 3 et 4). Dans ce cas, la valeur ED de l'amidon obtenue à l'aide de la méthode par différence est même légèrement supérieure à 100% de la teneur en énergie brute.

Différentes raisons peuvent expliquer ces écarts. Une première réside dans la nature des régimes utilisés. La méthode par différence est généralement appliquée avec des régimes de base particulièrement digestibles pour lesquels les interactions digestives avec la matière première testée sont limitées. Sa valeur nutritionnelle est alors maximale. A l'inverse, la méthode par régression (essai 4 et NOBLET et al, 1990a) est particulièrement utile lorsque l'on souhaite étudier la valeur nutritionnelle dans un contexte de régimes complexes. Dans ce cas, la valeur nutritionnelle des matières premières hautement digestibles est conforme aux valeurs espérées alors que celles des matières premières riches en parois végétales ou en matières grasses est inférieure (NOBLET et al, 1990a). Une deuxième hypothèse concerne la composition des régimes. Dans la méthode par différence, une fraction du régime de base est remplacée par la matière première à tester, la différence de valeur nutritionnelle étant affectée uniquement à celle-ci. Or, l'utilisation digestive du régime de base peut être modifiée, notamment suite à des différences dans l'importance des sécrétions endogènes. Enfin, avec la méthode par régression ou lorsque l'aliment est distribué seul, les pertes endogènes sont attribuées à l'ensemble des matières premières ou à l'aliment. Il n'est alors pas surprenant d'obtenir un CUD de l'énergie de l'amidon de maïs qui soit légèrement inférieur à 100% (essai 4) puisque la dégradation complète de l'amidon a occasionné des sécrétions digestives avant la fin de l'intestin grêle (SHI and NOBLET, 1993) qui réduisent l'utilisation digestive apparente de l'énergie de l'amidon de maïs. D'autres raisons (effets du niveau d'alimentation, des minéraux du CMV, ...) peuvent être également invoqués. Il apparaît donc que, comparativement à la méthode par régression, la valeur nutritionnelle des matières premières dont la composition chimique est nettement différente de celle d'un régime de base standard est supérieure lorsqu'elle résulte de la méthode par différence.

En définitive, même si la méthode par régression est moins précise quant à la valeur nutritionnelle de chaque matière première et que sa mise en oeuvre est plus délicate, les résultats obtenus reflètent probablement mieux la valeur nutritionnelle réelle de l'aliment. De plus, la valeur nutritionnelle rapportée dans les tables est, en raison de ces problèmes méthodologiques et des effets d'autres facteurs discutés ci-après, surestimée pour des matières premières riches en parois végétales ou en matières grasses.

3.2. Effets du type sexuel ou du génotype

De nombreuses études ont rapporté des différences d'utilisation digestive de l'énergie ou des matières azotées, généralement non significatives, entre types génétiques (SUNDSTOL et al, 1979; HOLMES et al, 1983; FEVRIER et al, 1990) ou entre types sexuels (BOWLAND, 1971; HOLMES et al, 1980). Ces résultats sont parfois d'interprétation difficile en raison de différences de niveau d'alimentation, de poids vif ou, plus

généralement, de niveau d'utilisation de la capacité digestive, entre groupes d'animaux. Ainsi, dans notre étude (essai 2), la supériorité des femelles peut s'interpréter par leur niveau d'alimentation légèrement plus faible bien que celui-ci ait un effet limité, voire nul, pour des régimes hautement digestibles (essai 1). A l'inverse, compte tenu de leur vitesse de croissance plus faible, les mesures ont été réalisées à un poids vif légèrement inférieur en moyenne, ce qui tendrait à réduire le CUD de l'énergie. Quoiqu'il en soit, même si dans nos conditions expérimentales, les femelles ont une utilisation digestive supérieure, l'écart entre types sexuels ou génétiques, dans les mêmes conditions de poids vif, niveau d'alimentation, ..., est rarement supérieur à un point de digestibilité. De plus, il est généralement difficile de quantifier et surtout d'expliquer les différences observées. Une analyse approfondie de ce phénomène nécessiterait des études prenant en compte le développement du tractus digestif, l'importance des sécrétions endogènes, la durée du transit digestif, ... dont la portée pratique, notamment pour l'énergie, serait limitée.

3.3. Effets du niveau d'alimentation

La réduction du niveau alimentaire se traduit généralement par une élévation du CUD de l'énergie et des principaux composants (notamment les matières azotées et les parois végétales) du régime. Ainsi, avec un régime relativement digestible, ROTH et KIRCHGESSNER (1984) rapportent une augmentation du CUD de l'énergie de 1,5 points pour un abaissement du niveau d'alimentation de trois à une fois l'entretien chez des porcs pesant en moyenne 60 kg. De la même façon, selon EVERTS et al (1986), le CUD de la matière organique est amélioré de 1,8 points suite à une réduction de moitié de l'apport alimentaire, chez des porcs en croissance recevant des régimes relativement fibreux. Des résultats similaires sont rapportés chez la truie (EVERTS et al, 1986). Ces observations sont conformes à celles de CUNNINGHAM et al (1962) qui obtenaient une réduction du CUD de l'énergie à la suite d'une élévation importante du niveau d'alimentation, la variation étant plus faible avec le régime de base qu'avec le régime de base additionné de cellulose.

Il faut remarquer que ces effets ont été généralement mesurés lors d'une modification drastique du niveau d'alimentation. A l'exception de la truie (lactation vs gestation), le niveau alimentaire ne varie généralement pas de façon aussi importante dans les conditions pratiques, les conséquences sur l'utilisation digestive du régime étant alors atténuées. Ainsi, chez la truie adulte, le CUD de l'énergie n'est pas affecté significativement par une variation de 20% en dessus et en dessous du niveau énergétique d'entretien (FERNANDEZ et al, 1986). De même, chez des truies alimentées à 2,4 (gestantes) et 3,6 (allaitantes) fois le niveau énergétique d'entretien, l'écart au niveau du CUD de la matière organique n'est que de 0,6 point en faveur des premières (EVERTS et al, 1986). Chez le porc en croissance pesant en moyenne 45 kg, une réduction de 25% du niveau alimentaire n'affecte le CUD de l'énergie qu'avec le régime riche en parois végétales (essai 1); cet effet disparaît chez des porcs plus lourds (H. FORTUNE, communication personnelle). De même, entre 25 et 100 kg, THORBEK et al (1984) n'observent pas d'effet significatif d'une réduction de 30% du niveau d'alimentation sur le CUD de l'énergie avec des régimes à base d'orge et de soja.

Ces observations suggèrent que l'effet du niveau d'alimentation sur le CUD de l'énergie n'est pas linéaire. Il est élevé lorsque l'on passe d'un niveau très faible (entretien) à un niveau proche des conditions de production, l'écart étant d'autant plus

important que le régime est riche en parois végétales ou que le poids vif des animaux est faible. Pour une variation modérée du niveau d'alimentation, l'écart devient significatif lorsque le régime a une teneur élevée en fibres et/ou le poids des animaux est faible. En pratique, on peut donc considérer que les effets du niveau d'alimentation sont faibles, voire négligeables, chez le porc en croissance pesant plus de 40 kg alors que, chez la truie, l'écart de niveau d'alimentation entre la gestation et la lactation va entraîner une modification importante du CUD de l'énergie (3,5 points selon EVERTS et al, 1986, pour trois régimes renfermant en moyenne 7% de cellulose brute). Mais les données de la bibliographie concernant la truie sont insuffisantes pour proposer une modulation de cet écart en fonction de la composition chimique de l'aliment. On peut toutefois supposer qu'il sera plus faible pour des régimes moins cellulotiques.

Les conséquences d'une modification du niveau d'alimentation sur le CUD des principaux nutriments va dans le même sens que pour l'énergie, la variation relative étant plus importante pour les parois végétales et les matières azotées. Mais, pour ces dernières, l'amélioration de la digestibilité va porter essentiellement sur la fraction dégradée dans le gros intestin, ce qui sera sans conséquence sur la valeur protéique de l'aliment (JUST et al, 1981). Il en sera de même lors de l'amélioration du CUD des matières azotées avec l'augmenta-

tion du poids vif des animaux. En fait, toute variation de la digestibilité des matières azotées avec le poids vif des animaux ou le niveau d'alimentation a pour conséquence essentielle une modification de la valeur énergétique de l'aliment.

3.4. Effets du poids vif des animaux

La plupart des essais de la bibliographie (CUNNINGHAM et al, 1962; ROTH et KIRCHGESSNER, 1984; EVERTS et al, 1986; JENTSCH et al, 1989), tout comme les résultats des essais 2 et 3, mettent en évidence une amélioration significative de la digestibilité de l'énergie chez le porc en croissance avec l'augmentation du poids vif. Toutefois, l'amélioration, exprimée en points de digestibilité par kg d'augmentation du poids vif, est plus importante au début de la période de croissance (entre 20 et 45-50 kg) qu'ultérieurement (JENTSCH et al, 1989; essai 2); elle est faible au delà de 100 kg (JENTSCH et al, 1989; essai 3); l'amélioration la plus élevée est notée chez le porcelet (ROTH et KIRCHGESSNER, 1984). De plus, l'accroissement du CUD de l'énergie avec le poids vif des animaux est d'autant plus important que le régime est riche en parois végétales (CUNNINGHAM et al, 1962; essai 3; J. NOBLET et al, non publié) ou que le niveau alimentaire est élevé (ROTH et KIRCHGESSNER, 1984). Les principaux résultats de la bibliographie sont rassemblés au tableau 10.

Tableau 10 - Effets du poids vif sur l'utilisation digestive de l'énergie: résultats bibliographiques.

Intervalle de poids, kg	Type de régime (1)	Variation CUD (2)	Auteurs
35-65	Céréales-soja-poisson (5.7%)	0,42	ROTH et KIRCHGESSNER, (1984)
30-90	Orge-soja (?)	0,25	THORBEK et al (1984)
45-100	Orge-poisson-herbe (6.1%)	0,51	JENTSCH et al (1989)
100-145	Orge-poisson-herbe (6.1%)	0,20	JENTSCH et al (1989)
45-85	Céréales-soja (3.6%)	0,27	Essai 2
45-105	Céréales-soja-... (5.7%)	0,39	Essai 3 (7 régimes)
105-150	Céréales-soja-... (5.7%)	0,17	Essai 3 (7 régimes)
45-105	Céréales-soja (4.0%)	0,32	Essai 3 (R1)
45-105	Céréales-soja+fibras (10.8%)	0,65	Essai 3 (R4)
40-80	Blé-soja (3.2%)	0,57	J. NOBLET et al, non publié
40-80	Blé-soja-son blé (5.8%)	0,90	J. NOBLET et al, non publié
40-80	Complexes (6.0%)	0,80	H. FORTUNE, communication personnelle

(1) Matières premières principales; entre parenthèses, taux de cellulose brute (% de matière sèche).

(2) Variation du CUD (point) par tranche d'augmentation du poids vif de 10 kg.

Ces données mettent en évidence qu'il existe des interactions entre le poids des animaux, la composition du régime et le niveau d'alimentation qui rendent difficile la proposition de règles permettant de quantifier précisément les effets du poids vif sur le CUD de l'énergie. Quelques estimations peuvent cependant être proposées à partir des données du tableau 10. Dans l'intervalle de poids 40-100 kg et avec des animaux alimentés de façon libérale, le CUD de l'énergie augmente d'environ 0,30, 0,45 et 0,50 à 0,80 point par tranche d'augmentation du poids vif de 10 kg lorsque les taux de cellulose brute de l'aliment sont, respectivement, de 4, 6 et plus de 6% de la teneur en matière sèche. Dans une situation extrême telle que celle du mélange de matières premières riches en fibres (essai 3), le calcul montre que, pour une teneur en cellulose brute de 27%, le CUD de l'énergie est accru de deux points lorsque le poids vif augmente de 10 kg (tableau 7). Au delà de 100 kg, l'effet du poids vif représenterait, en première approximation, la

moitié de celui qui est mesuré entre 40 et 100 kg. Enfin, les données de la bibliographie nous semblent insuffisantes pour quantifier l'effet du poids vif entre le sevrage et 30-35 kg.

3.5. Interactions entre la composition de l'aliment et le stade physiologique: mécanismes impliqués

Les données bibliographiques et les résultats de nos essais montrent que la digestibilité de l'énergie et des nutriments de l'aliment est directement affectée par des facteurs tels que le poids des animaux ou le niveau d'alimentation. Mais ces effets sont susceptibles d'interagir fortement. L'illustration la plus nette est fournie par les résultats de l'essai 4 dans lequel sont comparés des porcs en «début» de croissance (en alimentation libérale) et des truies adultes recevant des quantités limitées d'aliment. Dans ce cas, l'importante sous-utilisation de la capacité digestive des truies résulte en une amélioration hautement

significative du CUD de l'énergie et des principaux nutriments, comparativement au porc en croissance. De plus, cette différence est associée à un effet négatif moindre des parois végétales sur le CUD de l'énergie (EVERTS et al, 1986; tableau 11) avec, pour conséquence essentielle, un écart d'autant plus grand que le régime ou la matière première a une faible concentration en énergie. Toutefois, la digestibilité supérieure des parois végétales chez la truie n'explique pas à elle seule la totalité de l'amélioration.

En fait, l'augmentation du poids vif des animaux et/ou la réduction de leur niveau d'alimentation s'accompagne d'un ralentissement du transit digestif et d'une durée de séjour dans le gros intestin plus importante (FURUYA et TAKAHASHI, 1980; STANOGLIAS et PEARCE, 1985; H. FORTUNE, communication personnelle). Ces phénomènes favorisent une accentuation des fermentations digestives pour l'ensemble des nutriments arrivant dans le gros intestin. Il peut ainsi être calculé, à partir des résultats de l'essai 4, que la digestibilité post-iléale de l'énergie est de 35 et 60%, respectivement chez les porcs en croissance et les truies. Le résultat supérieur chez la truie concerne autant les parois végétales que les autres fractions de la matière organique présentes à la fin de l'intestin grêle (SHI et NOBLET, 1993).

La réduction du CUD de l'énergie avec l'augmentation de la teneur en parois végétales du régime (environ un point par point de NDF) suggère que celles-ci ont un rôle comparable à celui d'un diluant, du moins chez le porc en croissance (équation 2; tableau 11) alors que la digestibilité des parois végétales est voisine de 40-50%. En raison de la nature des parois végétales utilisées (paille de blé), le coefficient obtenu dans l'essai 4 (1,33) est supérieure à ceux calculés par KING et TAVERNER (1975), FERNANDEZ et JORGENSEN (1986) ou NOBLET et PEREZ (1993) (0,8 à 1,0). Quoiqu'il en soit, il apparaît clairement, même si les parois végétales présentes dans l'aliment sont partiellement dégradées, elles contribuent de façon négligeable à l'apport d'énergie digestible au porc. Toutefois, dans le cas de matières premières dont les parois végétales sont très digestibles (CHABEAUTI et al, 1991) ou lorsque le faible niveau d'alimentation favorise une dégradation plus

importante des parois végétales (essai 4), leur contribution énergétique devient positive.

3.6. Conséquences pratiques

Le paragraphe précédent a mis en évidence que les variations de l'utilisation digestive de l'énergie, non liées à la composition de l'aliment lui-même, sont essentiellement dues à des modifications de l'intensité des fermentations digestives au niveau du gros intestin et, par conséquent, de la quantité d'acides gras volatils produits. Or, le rendement d'utilisation de l'énergie (EM) dégradée au niveau du gros intestin est inférieur à celui de l'énergie digérée par voie enzymatique avant la fin de l'intestin grêle (55 vs 75% selon NOBLET et al, 1989 et J. NOBLET et al, non publié). De plus, l'amélioration du CUD de l'énergie observée lors de l'augmentation du poids vif ou lorsque la truie est comparée au porc en croissance s'accompagne de pertes d'énergie dans les urines ou sous forme de méthane qui sont notablement accrues (essais 3 et 4). La différence de valeur énergétique mesurée avec comme critère d'évaluation la teneur en ED se réduit donc si l'on considère la teneur en EM et, a fortiori, la teneur en EN. Ainsi, pour les 14 régimes de l'essai 4, l'écart moyen d'ED entre la truie et le porc en croissance représente environ 10% de la teneur en ED mesurée chez la truie. Cette différence est réduite à 7 et 5% sur la base, respectivement, des teneurs en EM et en EN.

Toutefois, même si l'écart de valeur énergétique entre porcs de poids vifs ou de stades physiologiques différents est diminué si l'on prend en compte le critère teneur en EN, il demeure important pour des régimes ou des matières premières particulièrement riches en parois végétales. Dans ce cas, il est alors nécessaire de disposer de relations permettant de quantifier les écarts de valeur énergétique entre groupes d'animaux. Dans le cas particulier et extrême des deux groupes de porcs de l'essai 4, des équations permettant de prédire la teneur en ED chez la truie à partir de la valeur ED mesurée chez le porc en croissance sont proposées (tableau 11). De la même façon, les valeurs moyennes de variation du CUD de l'énergie en fonction du taux de parois végétales (tableau 10) peuvent être utilisées pour prendre en compte l'effet du poids vif chez le porc en croissance.

Tableau 11 - Relations entre la valeur nutritionnelle mesurée chez la truie (t) et celle déterminée chez le porc en croissance (c) (composition chimique en % de la teneur en matière sèche) (essai 4).

N°	Équation	R ²	Écart-type
1	$CUD_{e,t} = 99,3 - 0,76 \times NDF$	0,83	1,6
2	$CUD_{e,c} = 101,4 - 1,33 \times NDF$	0,95	1,4
3	$EM/ED_t = 96,4 - 0,20 \times MAT$	0,33	1,0
4	$EM/ED_c = 100,6 - 0,20 \times MAT$	0,56	0,6
5	$ED_t = 6,50 + 0,65 \times ED_c$	0,84	0,35
6	$EM_t = 5,14 + 0,69 \times EM_c$	0,87	0,31
7	$ED_t = 5,82 + 0,58 \times ED_c + 0,053 \times MA + 0,098 \times MG$	0,96	0,20
8	$EM_t = 4,63 + 0,64 \times EM_c + 0,029 \times MAT + 0,096 \times MG$	0,97	0,15
9	$ED_t - ED_c = -1,43 + 0,106 \times NDF + 0,037 \times MAT + 0,041 \times MG$	0,88	0,21
10	$EM_t - EM_c = -1,68 + 0,090 \times NDF + 0,027 \times MAT + 0,050 \times MG$	0,90	0,17

Les tables de valeur nutritionnelle pour le porc proposent des valeurs énergétiques moyennes pour les principales matières premières. S'il est relativement clair que les teneurs en ED, EM ou EN des matières premières riches en amidon ou pauvres en parois végétales (céréales, par exemple) sont peu influencées

par le poids des animaux, le niveau d'alimentation ou la méthode de détermination de la valeur énergétique (voir 3.1 et tableau 9), celles des matières premières riches en parois végétales et, dans une moindre mesure, en matières grasses, sont susceptibles de varier fortement. Les conditions d'estima-

tion des valeurs rapportées dans les tables ne sont pas spécifiques; il est toutefois vraisemblable que, pour les aliments riches en parois végétales, les mesures ont été réalisées sur des porcs en croissance recevant des régimes simples à des niveaux d'alimentation modérés, la matière première à tester étant toutefois introduite à un taux relativement important. De telles conditions sont favorables à une utilisation digestive élevée. Il n'est donc pas surprenant que les valeurs données par les tables pour ces aliments soient plus élevées que celles mesurées chez les porcs en croissance de l'essai 4, dans une situation de régimes complexes distribués à des niveaux d'alimentation élevés (tableau 9). A l'inverse, les valeurs mesurées chez la truie adulte sont équivalentes ou supérieures aux valeurs suggérées par les tables (tableau 9).

De tels résultats ont des répercussions pratiques non négligeables au niveau de la formulation à moindre coût puisque la valeur nutritionnelle et le prix d'intérêt des aliments riches en fibres (ou en matières grasses) sont fonction du type d'animal recevant l'aliment. En particulier, nos résultats mettent en évidence que la valeur nutritionnelle de tels aliments est surestimée chez le porc en début de croissance et légèrement sous-estimée chez la truie. On peut penser que les valeurs des tables sont adaptées au cas du porc en finition. En conséquence, des valeurs énergétiques fonction de l'animal auquel elles sont destinées devraient être attribuées aux matières premières riches en parois végétales.

Nos résultats posent enfin le problème des conditions optimales pour déterminer la valeur énergétique des aliments pour le porc. Tout d'abord, au niveau de l'approche, la méthode par régression appliquée à des régimes complexes, proches de ceux utilisés en pratique, est séduisante. Toutefois, sa mise en oeuvre est délicate. Ensuite, l'évolution du CUD de l'énergie avec le poids des porcs suggère que les mesures de digestibilité soient réalisées avec des animaux «modèles» représentatifs de la moyenne de l'aliment consommé par les porcs auxquels on souhaite appliquer les résultats. Dans ce contexte, des porcs de 60-70 kg représentent un compromis pour la période allant de 30 à 100 kg de poids vif. Les corrections à apporter pour l'application des valeurs ainsi obtenues à d'autres situations (truie en gestation, par exemple) devraient être suggérées. À partir des résultats de EVERTS et al (1986), on peut penser que les données mesurées chez le porc en croissance sont applicables à la truie allaitante.

CONCLUSIONS

L'ensemble de nos résultats et ceux de la bibliographie mettent clairement en évidence une amélioration de l'utilisation digestive de l'énergie avec l'augmentation du poids vif et avec la réduction du niveau d'alimentation. L'effet est le plus important quand les deux effets sont combinés lors, par exemple, de la comparaison de truies adultes alimentées de façon restreinte et de porcs en croissance alimentés libéralement. Dans ce cas précis, l'écart au niveau du CUD de l'énergie est de 10% en faveur des truies. De plus, l'effet du poids des animaux ou du niveau d'alimentation interagit fortement avec la composition du régime, les écarts étant négligeables pour des régimes ou des matières premières contenant peu de parois végétales. A l'inverse, pour des matières premières riches en parois végétales, les écarts de valeur énergétique entre groupes d'animaux deviennent importants. Toutefois, les différences mesurées en terme de valeur ED sont atténuées lorsque les comparaisons sont effectuées sur la base des valeurs EM ou EN.

Ces résultats ont des répercussions sur le mode d'évaluation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. La prise en compte des variations d'utilisation digestive de l'énergie avec notamment le poids vif ou le niveau d'alimentation nécessite quelques études complémentaires sur les matières premières riches en parois végétales ou en matières grasses. Ces travaux ne devront pas ignorer l'analyse des mécanismes impliqués, notamment les modifications du transit au niveau des différents compartiments du tractus digestif ou la nature et l'importance des sécrétions endogènes. De tels résultats combinés aux relations prenant en compte les caractéristiques chimiques de l'aliment conduiront à une approche plus mécanistique de l'étude des variations de la digestibilité et de la disponibilité des nutriments.

REMERCIEMENTS

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

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOWLAND J.P., 1971. *Can. J. Anim. Sci.*, 51, 503-510.
- CHABEAUTI E., NOBLET J., CARRÉ B., 1991. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 32, 207-213.
- CUNNINGHAM H.M., FRIEND D.W., NICHOLSON J.W.G., 1972. *Can. J. Anim. Sci.*, 42, 167-175.
- EVERTS H., SMITS B., JONGBLOED A.W., 1986. *Neth. J. Agric. Sci.*, 34, 501-503.
- FERNANDEZ J.A., JORGENSEN H., JUST A., 1986. *Anim. Prod.*, 43, 127-132.
- FERNANDEZ J.A., JORGENSEN J.N., 1986. *Livest. Prod. Sci.*, 15, 53-71.
- FÉVRIER C., BOURDON D., AUMAÏTRE A., 1990. In «Symposium sur le porc chinois», 233-234, INRA éd., Paris, 262 p.
- FURUYA S., TAKAHASHI S., 1980. *Jap. J. Zootech. Sci.*, 51, 33-39.
- HOLMES C.W., CARR J.P., PEARSON G., 1980. *Anim. Prod.*, 31, 279-289.
- HOLMES C.W., SMITH W.C., MOORE Y.F., 1983. *N. Z. J. Agric. Res.*, 26, 447-450.
- INRA, 1984. L'alimentation des animaux monogastriques: porc, lapin, volailles. INRA éd., Paris, 282 p.
- JENTSCH W., HOFFMANN L., SCHEIMANN R., WITTENBURG H., 1989. *Arch. Anim. Nutr.*, 39, 279-297.
- JUST A., JORGENSEN H., FERNANDEZ J.A., 1981. *Br. J. Nutr.*, 46, 209-219.
- KING R.H., TAVERNER, M.R., 1975. *Anim. Prod.* 21, 275-284.
- NOBLET J., FORTUNE H., DUPIRE C., DUBOIS S., 1990a. *Journées Rech. Porcine en France*, 22, 175-184.
- NOBLET J., DUPIRE C., FORTUNE H., 1990b. *Journées Rech. Porcine en France*, 22, 229-236.
- 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., KAREGEC C., DUBOIS S., 1991. In «Energy Metabolism of Farm Animals», 107-110, ETH éd., Zurich, 488 p.
- NOBLET J., SHI X.S., 1992. *Livest. Prod. Sci.* (in press).

- NOBLET J., PEREZ J.M., 1993. J. Anim. Sci. (soumis pour publication).
- NOBLET J., SHI X.S., DUBOIS S., 1993. Br. J. Nutr. (in press).
- ROTH F.X., KIRCHGESSNER M., 1984. Z. Tierphysiol. Tierernähr. u. Futtermittelkunde, 51, 79-87.
- SAS, 1988. SAS User's Guide: Statistics. SAS Inst., Cary, NC.
- SHI X.S., NOBLET J., 1993. Livest. Prod. Sci. (in press).
- STANOGLIAS G., PEARCE G.R., 1985. Br. J. Nutr., 53, 513-530.
- SUNDSTOL F., STANDAL N., VANGEN O., 1979. Acta Agriculturae Scandinavica, 29, 337-345.
- THORBEG G., CHWALIBOG A., HENCKEL S., 1984. Beretning fra Statens Husdyrbrugsforsøg, 563, København, 114 p.
- WISEMAN J., COLE D.J.A., HARDY B., 1990. Anim. Prod. 50, 513-518.

Annexe 1 - Influence du poids vif sur l'utilisation digestive de l'énergie et des nutriments chez le porc : interaction avec la nature du régime (essai 3).

Régime	1	2	3	4	5	6	Signif. (1)
Poids vif, kg							
Stade 1	45,0	43,9	42,9	44,4	43,1	44,9	7,1
Stade 2	105,0	100,5	98,8	106,3	100,8	107,2	S**
Stade 3	150,8	145,8	149,2	146,5	150,4	151,4	
Matière sèche ingérée, g/j							
Stade 1	1443	1363	1394	1631	1259	1430	219
Stade 2	2328	2173	2253	2711	2097	2248	R**; S**
Stade 3	2461	2603	2682	2610	2625	2583	
CUD énergie, %							
Stade 1	85,3	90,6	87,2	71,6	86,0	75,1	1,1
Stade 2	87,2	91,6	89,3	75,6	88,7	77,4	R**; S**
Stade 3	87,2	92,2	90,3	78,0	88,9	78,0	RxS*
CUD azote, %							
Stade 1	83,7	86,8	82,1	68,9	85,4	72,5	2,0
Stade 2	87,8	89,1	87,0	75,0	88,7	76,8	R**; S**
Stade 3	87,0	89,5	88,8	76,3	89,4	77,4	
CUD NDF, %							
Stade 1	53,8	59,4	53,5	47,6	51,7	49,7	4,1
Stade 2	53,8	63,4	59,2	54,2	59,8	54,5	R**; S**
Stade 3	56,4	65,9	61,6	59,0	62,7	57,6	
CUD matières grasses, %							
Stade 1	53,9	55,8	41,9	38,6	80,3	76,6	5,3
Stade 2	60,0	63,2	53,5	59,2	84,6	76,1	R**; S**
Stade 3	62,4	65,7	57,5	48,6	84,1	74,7	RxS*
EM/ED, %							
Stade 1	97,4	97,4	97,2	96,9	97,3	97,0	0,5
Stade 2	95,0	96,3	95,3	95,4	95,9	95,8	R**; S**
Stade 3	94,7	96,3	95,5	94,4	95,5	95,4	RxS**
Energie CH4, % de ED							
Stade 1	0,44	0,56	0,40	0,40	0,33	0,86	0,27
Stade 2	0,60	0,62	0,57	0,97	0,48	1,01	R**; S**
Stade 3	0,76	0,62	0,57	1,21	0,66	1,13	
ED, MJ/kg MS (2)							
Stade 1	15,39 ^a	16,33	15,40 ^a	12,93 ^a	17,11 ^a	14,93 ^a	0,20
Stade 2	15,73 ^b	16,51	15,77 ^b	13,65 ^b	17,65 ^b	15,40 ^b	R**; S**
Stade 3	15,73 ^b	16,62	15,95 ^b	14,09 ^c	17,70 ^b	15,51 ^b	RxS*
EM, MJ/kg MS (2)							
Stade 1	14,99	15,90	14,96	12,53 ^a	16,65	14,48 ^a	0,19
Stade 2	14,94	15,90	15,02	13,02 ^{ab}	16,92	14,76 ^{ab}	R**; S**
Stade 3	14,89	16,00	15,23	13,29 ^b	16,91	14,80 ^b	RxS**

(1) Pour chaque variable, sont indiqués successivement sur les 3 lignes, l'écart type, les effets principaux (R: effet régime; S: effet stade) et l'effet d'interaction stade x régime. Niveaux de signification: **; P<0,01; *; P<0,05.

(2) Pour chaque régime, les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement (P>0,05) entre stades.

Annexe 2 - Composition chimique et utilisation de l'énergie de 14 régimes chez la truie adulte et le porc en croissance (essai 4).

Régime	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Composition chimique,														
% de matière sèche														
Minéraux	10,3	9,5	9,0	9,9	10,8	10,0	7,9	9,0	8,2	8,3	9,3	8,9	8,9	8,4
Matières azotées	24,6	17,0	23,7	20,2	18,8	27,4	23,4	19,7	19,0	15,9	19,8	19,9	17,1	20,0
Matières grasses	10,1	9,0	2,1	8,0	7,0	2,6	8,3	9,0	8,0	6,3	3,8	6,8	1,6	7,6
Cellulose brute	7,8	7,3	3,7	4,1	9,2	7,2	4,2	7,9	4,8	5,0	6,0	4,9	9,2	7,9
NDF	24,1	23,3	11,8	15,7	26,1	21,7	12,2	22,4	18,6	17,4	19,6	14,3	22,7	19,8
ADF	9,5	9,1	4,5	5,2	11,0	8,6	4,9	9,4	5,8	6,0	7,3	5,5	10,6	9,2
ADL	1,7	1,7	0,9	1,1	1,8	1,3	0,8	1,5	1,5	1,0	1,1	0,8	1,5	1,0
Amidon	23,0	34,6	46,2	37,4	29,2	23,5	38,1	29,2	37,4	45,3	39,9	39,2	39,2	38,4
Sucres	4,1	3,8	4,2	6,2	5,0	7,3	5,0	6,2	6,1	3,6	4,0	7,1	5,7	3,1
Énergie brute, MJ/kg	19,21	18,62	17,65	18,67	18,42	17,86	19,23	19,10	19,07	18,23	18,04	18,49	17,47	18,94
CUD énergie, %														
Truies	82,5	79,5	90,1	86,4	78,8	85,8	88,7	81,7	84,7	87,9	85,6	89,4	79,8	85,2
Croissance	70,8	68,6	86,0	78,4	65,4	73,8	83,6	71,0	77,4	80,0	75,5	83,9	72,1	75,2
EM/ED, (x100)														
Truies	91,5	92,5	93,1	93,7	91,1	89,3	92,6	92,2	93,3	93,2	91,5	92,8	93,0	92,5
Croissance	95,3	97,0	97,1	97,1	96,5	94,2	95,8	97,3	96,6	96,8	96,9	96,8	97,2	96,0
ED, MJ/kg MS														
Truies	16,00	14,90	15,85	16,07	14,39	15,33	17,01	15,53	15,97	16,00	15,29	16,50	13,84	16,06
Croissance	13,74	12,86	15,13	14,57	11,96	13,18	16,02	13,50	14,60	14,57	13,47	15,50	12,51	14,17