

Prédiction de la digestibilité de la matière organique et de l'énergie chez le porc en croissance à l'aide d'une méthode in vitro

Yolande JAGUELIN-PEYRAUD, Jean NOBLET

INRA – Unité Mixte de Recherches sur le Veau et le Porc
35590 Saint Gilles

avec la collaboration technique de P. BODINIER, S. DANIEL, J. DELANOE, Y. LEBRETON,
F. LEGOUEVEC, A. ROGER et R. VILBOUX

Prédiction de la digestibilité de la matière organique et de l'énergie chez le porc en croissance à l'aide d'une méthode in vitro

La méthode de BOISEN et FERNANDEZ (1997) pour mesurer la digestibilité in vitro de la matière organique (dMOv, %) a été mise en œuvre sur 113 aliments complets (79 en farine et 34 en granulés) et 66 matières premières (farine) dont la digestibilité in vivo de la matière organique (dMO) et de l'énergie (dE) et la teneur en énergie digestible (ED) avaient été mesurées sur des porcs de 60 kg de poids vif. La répétabilité et la précision de la méthode ainsi qu'une variante de la méthode de référence en vue de son automatisation ont été évaluées. Les données obtenues sur les aliments complets ont permis le calcul d'équations de prédiction de dMO, dE ou ED à partir de dMOv et de critères chimiques. Les niveaux de répétabilité et de précision de la méthode de mesure de dMOv sont très satisfaisants (0,7 point). Outre dMOv, les meilleures équations de prédiction de dMO et dE prennent en compte la teneur en matières minérales et un critère parois végétales (ADF ou cellulose brute) ; pour la prédiction de ED, la teneur en matières grasses est à considérer. Pour toutes les équations, le coefficient de variation est inférieur à 2 %. Les équations permettent une prédiction très satisfaisante de dE et ED des matières premières. Cependant, les équations établies à partir des aliments présentés en farine sous-estiment la valeur énergétique d'un aliment qui a été granulé et elles ne s'appliquent pas à la prédiction de la valeur énergétique des aliments pour la truie adulte.

Prediction of organic matter and energy digestibility in pig feeds from an vitro method

The method of BOISEN and FERNANDEZ (1997) for measuring in vitro digestibility of organic matter (dMOv, %) has been used on 113 compound feeds (79 as mash and 34 as pellets) and 66 ingredients (as mash) which digestibility of organic matter (dMO) and energy (dE) and digestible energy content (ED) had been measured in 60 kg growing pigs. The repeatability and accuracy of the method and an adaptation of the method in order to automate it were evaluated. Data obtained on compound feeds were used to establish prediction equations of dMO, dE and ED from dMO and chemical criteria. The levels of accuracy and repeatability of dMOv measurement were quite satisfactory (0,7 point). Apart from dMOv, the best prediction equations of dMO or dE included ash content and a cell wall criteria (ADF or crude fibre) ; for prediction of ED, fat content was also considered. The coefficient of variation of all equations was below 2 %. The equations allow a satisfactory prediction of dMO and dE of the 66 ingredients. However, the equations established on data obtained on mash feeds underestimate the nutritional value of pelleted feeds and are not applicable to prediction of energy value of feeds for adult pigs.

INTRODUCTION

La détermination de la valeur énergétique d'un aliment pour le porc repose principalement sur la connaissance de sa teneur en énergie digestible (ED). Celle-ci peut être mesurée directement sur des animaux par collecte des excréta mais cette approche est lourde, coûteuse et le résultat est obtenu à l'issue de mesures durant plusieurs semaines. Elle représente cependant la méthode de référence. Une deuxième solution pour estimer la valeur ED consiste, pour une matière première ou pour un aliment complet dont on connaît la composition centésimale, à utiliser les teneurs moyennes en ED des tables de valeurs alimentaires (INRA et AFZ, 2002). Cette solution, même si elle est suffisante dans de nombreux cas, ne peut cependant pas prendre en compte la variabilité de la composition chimique des matières premières ou ne s'applique pas à un mélange dont la composition centésimale est inconnue. Dans ce cas, la valeur ED doit être estimée à partir de paramètres accessibles directement sur l'aliment et qui sont utilisés comme prédicteurs de la valeur ED (NOBLET et PEREZ, 1993, LE GOFF et NOBLET, 2001). Cette approche est cependant limitée par la précision des méthodes d'analyse, par, à nouveau, le délai nécessaire à la réalisation des analyses et enfin par les limites du domaine d'application des équations. Les réserves pour ces trois solutions ont conduit à rechercher des méthodes d'estimation rapide de la teneur en ED.

Parmi ces méthodes rapides, les méthodes faisant appel à l'absorption dans le proche infra-rouge ont fait leur preuve pour l'estimation de caractéristiques chimiques simples, telles que les teneurs en eau, matières azotées, acides aminés ou matières grasses (BERTRAND, 2002). Leur application à la prédiction de la valeur nutritionnelle des aliments du porc reste encore très délicate, d'autant que l'étape de calibration requière un nombre relativement élevé d'échantillons dont la valeur *in vivo* est disponible (AUFRERE et al, 1996 ; VAN BARNEVELD et al, 1999). Les techniques *in vitro* sont également à considérer comme des méthodes rapides ; elles font appel soit à des inoculum préparés à partir de contenus digestifs de porc (FURUYA et al, 1979), soit à des préparations enzymatiques (VAN DER MEER et PEREZ, 1992 ; BOISEN et FERNANDEZ, 1997). La méthode de ces derniers auteurs est couramment utilisée au Danemark pour l'évaluation des aliments.

L'objet du présent travail est de proposer des équations de prédiction de la digestibilité (*in vivo*) de la matière organique (dMO) et de l'énergie (dE) et de la teneur en ED des aliments à partir de la digestibilité *in vitro* de la matière organique (dMOv) mesurée selon la méthode de BOISEN et FERNANDEZ (1997). Dans ce but, la dMOv de 115 aliments composés a été mesurée; les valeurs de dMO, dE et ED de ces aliments avaient été mesurées préalablement. Les équations obtenues ont été validées sur 68 matières premières également mesurées pour leur dMOv, dMO, dE et ED. La démarche d'établissement des équations de prédiction à partir de mesures sur des régimes composés a été préférée dans la mesure où les valeurs de dMO, dE et ED ont été obtenues par mesure directe alors que celles obtenues sur les matières premières, même si elles présentent

une variabilité plus importante, sont la plupart issues de calculs (méthode par différence) et ont une précision nettement plus faible que celle des valeurs obtenues sur les aliments complets.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Aliments et mesures *in vivo* de la digestibilité des aliments

Un total de 115 aliments dont les valeurs de dMO, dE et ED ont été mesurées dans les années 90 à l'INRA de St Gilles a fait l'objet de la présente étude. Environ les 2/3 de ces régimes sont ceux de la publication de LE GOFF et NOBLET (2001). La moyenne et l'étendue des principales caractéristiques chimiques des aliments sont rapportées dans le tableau 1. Les méthodes utilisées pour les mesures de digestibilité sont celles décrites par NOBLET et al (1989) et LE GOFF et NOBLET (2001). La plupart des aliments ont été distribués sous forme de farine humidifiée ; 34 ont été distribués après granulation. Les moyennes et étendues des valeurs de dMO, dE et ED des 115 aliments sont rapportées dans le tableau 1.

Pour ce qui concerne les matières premières dont les résultats ont été utilisés pour l'étape de validation, les valeurs de dMO, dE et ED ont été presque toutes calculées à l'aide de la méthode par différence. Elles étaient en fait introduites à des taux variables dans une partie des 115 régimes de la présente étude. Les 68 matières premières correspondent pour l'essentiel à celles listées par LE GOFF et NOBLET (2001) et étaient toutes dans des aliments sous forme de farine.

1.2. Méthodes *in vitro* de mesure de la digestibilité

La méthode de digestibilité de la matière organique proposée par BOISEN et FERNANDEZ (1997) est une méthode multi-enzymatique qui comprend trois incubations successives à la pepsine, à la pancréatine et au Viscozyme (complexe multi-enzymes contenant des arabinase, cellulase, β -glucanase, hemicellulase et xylanase). Elle a d'abord été réalisée selon le protocole décrit par BOISEN et FERNANDEZ (1997) (méthode 1). Dans un objectif de semi-automatisation de la méthode, une variante dans les équipements utilisés pour l'incubation a été testée (méthode 2). Pour les deux méthodes, les analyses ont été effectuées par séries (24 mesures par série pour la méthode 1 et 48 mesures par série pour la méthode 2), à raison de trois mesures par échantillon d'aliment (aliment complet ou matière première). Dans chaque série, un échantillon témoin (blé) est également mesuré en triple et, périodiquement, un blanc (à savoir pas d'aliment introduit) est mesuré (également en triple). Au moment de la mesure de dMOv, les teneurs en matières minérales et en matière sèche de l'échantillon sont déterminées. Chaque mesure est réalisée sur environ 500 mg d'échantillon broyé au broyeur à marteau (Retsch) équipé d'une grille de 1 mm. Les analyses ont porté sur les 115 aliments complets et les 68 matières premières.

Tableau 1 - Caractéristiques moyennes des régimes et des matières premières utilisés dans l'étude

	Régimes (farine ; n=79)		Régimes (granulé ; n=34)		Matières premières (n=66)	
	Moyenne	Min-max	Moyenne	Min-max	Moyenne	Min-max
Matière azotées totales ^a	16,7	10,0-21,3	16,7	11,7-23,2	20,2	0,6-54,4
Matières minérales ^a	5,7	4,5-8,4	5,7	4,7-8,1	4,4	0-16,0
Matières grasses ^a	3,2	1,0-10,8	4,1	1,7-11,4	6,5	0-44,1
ADF ^a	5,3	2,4-11,2	5,2	2,0-21,2	13,5	0-55,5
Cellulose brute ^a	4,4	1,9-10,8	4,3	1,5-18,1	11,4	0,2-57,0
dMO, % ^b	85,9	73,7-91,1	88,3	68,1-93,8	72,4	17,5-100,0
dE, % ^b	83,2	70,3-88,7	86,7	65,0-92,5	70,4	11,8-100,0
ED, kJ/g ^b	15,19	12,66-16,92	15,97	11,70-17,68	13,95	2,22-23,55
dMOv, % (méthode 1) ^b	85,2	76,0-91,5	87,6	70,6-92,7	73,1	9,9-97,4
dMOv, % (méthode 2) ^b	86,1	75,6-92,2	88,2	70,0-94,5	73,8	10,1-100,1
dEp1, % ^c	83,2	75,1-89,8	84,6	61,3-90,5	70,8	7,2-97,91
dEp2, % ^c	80,3	70,1-87,2	82,9	64,0-88,6	66,9	3,0-93,7
EDp, kJ/g ^c	15,16	13,57-17,09	15,61	11,10-17,69	13,43	0,86-21,12

^a En % de la matière sèche

^b dMO : digestibilité (in vivo) de la matière organique, dE : digestibilité (in vivo) de l'énergie, ED : teneur en énergie digestible, dMOv : digestibilité in vitro de la matière organique. Les régimes contenant de la graine de colza non granulés et la graine de colza broyée n'ont pas été considérés (voir texte)

^c dEp : digestibilité estimée ou prédite de l'énergie (dEp1 : à partir de l'équation 10 du tableau 2 ; dEp2 : à partir de l'équation de BOISEN et FERNANDEZ, 1997, dE, % = $-14,0 + 1,106 \text{ dMOv, \%}$, méthode 1) ; EDp : ED prédite à partir de l'équation 14 du tableau 2

1.2.1. Méthode 1

L'échantillon est placé dans une fiole erlenmeyer de 100 ml avec un barreau magnétique et mis en solution avec 25 ml de tampon phosphate 0,1M, à pH 6,0 et agité à température ambiante pendant 1 à 2 minutes. Le pH de la solution est abaissé avec 10 ml d'une solution d'acide chlorhydrique 0,2M et ajusté à pH 2 (+/-0,05) avec de l'acide chlorhydrique 1M. Un ml de la solution de pepsine (porcine, 2000 FIP U/g ; référence Merck 7190) à 25 mg/ml d'eau ultra pure est ajouté. Afin de minimiser les fermentations au cours des différentes incubations, 0,5 ml d'une solution de chloramphénicol (0,5 g dans 100 ml d'éthanol) est additionné au mélange. Les fioles erlenmeyers bouchées sont placées dans un bain-marie à agitation (150 rpm) maintenu à 39°C pendant 2 h ± 1 min (première incubation).

A l'issue de cette première incubation, les fioles erlenmeyers sont retirées du bain-marie et 10 ml de tampon phosphate 0,2M à pH 6,8 et 5 ml de solution de NaOH 0,6M sont ajoutés au mélange et le pH est ajusté à 6,8 ± 0,05 avec de l'acide chlorhydrique 1M ou NaOH 1M. Un ml de la solution de pancréatine (porcine, grade IV, référence Sigma P-1751) à 100 mg/ml d'eau ultra pure est additionné au mélange. Les erlenmeyers sont bouchés et placés au bain-marie comme précédemment pendant 4 heures (deuxième incubation).

A la fin de la deuxième incubation, le mélange est additionné de 10 ml d'une solution d'EDTA 0,2M et le pH est abaissé à 4,8 ± 0,05 avec une solution d'acide acétique à 30 % avant d'ajouter 0,5 ml de Viscozyme 120L (référence Sigma

V 2010) dans chaque erlenmeyer. Après 18 heures d'incubation (troisième incubation) au bain-marie à 39°C, la réaction enzymatique est bloquée avec 1 ml de solution de phénylméthylsulfonylfluorure (référence Sigma P-7626) à 10 mg/ml de méthanol et l'agitation est maintenue pendant 2 minutes à température ambiante.

Le résidu issu des incubations successives est récupéré quantitativement dans un creuset en verre fritté de porosité 2 (référence Foss TEC 10001172) par filtration sur fiole à vide et après plusieurs rinçages à l'eau ultra pure. Préalablement à la filtration, on a ajouté 400 mg ± 50 mg de célite dans le creuset et il a été placé au four à moufle à 550°C pendant 4 heures et pesé très exactement après refroidissement dans un dessiccateur. Le résidu est rincé avec successivement deux fois environ 10 ml d'éthanol, une fois environ 10 ml d'acétone et une dernière fois de l'eau ultra pure. Les creusets sont mis à l'étuve à 103°C pendant 4 heures, refroidis dans un dessiccateur jusqu'à poids constant et pesés ; ils sont ensuite placés au four à moufle à 550°C pendant 4 heures, refroidis dans un dessiccateur jusqu'à poids constant et pesés.

1.2.2. Méthode 2

Au lieu d'être introduit dans une fiole erlenmeyer, l'échantillon d'environ 500 mg est pesé dans un sachet poreux pour Fibersac (référence 634042800.11, Laboratoires Humeau, 44240 La Chapelle/Erdre) qui est ensuite soudé. Les 48 sachets de chaque série sont répartis dans quatre flacons en verre fermés et placés dans un incubateur Daisy II ^{200/220} Rumen Fermenter de chez Ankom Technologies (USA) distribué par les laboratoires Humeau. Les quantités de tampon,

de solutions acide ou basique et d'enzymes sont ajustées en fonction du nombre de sachets dans chacun des quatre flacons et sur la base des quantités par échantillon de la méthode proposée par BOISEN et FERNANDEZ (1997). Les temps d'incubation, les pH des solutions et la température sont identiques aux indications de la méthode originale. A l'issue des trois incubations, les sachets sont retirés des flacons et rincés une fois avec de l'eau ultra pure, deux fois avec de l'éthanol, une fois avec de l'acétone et une dernière fois avec de l'eau ultra pure puis ils sont mis à l'étuve à 103°C pendant 4 heures, refroidis dans un dessiccateur jusqu'à poids constant et pesés. Ils sont ensuite placés au four à moufle à 550°C pendant 4 heures, refroidis dans un dessiccateur jusqu'à poids constant et pesés.

1.2.3. Calculs

Le coefficient de digestibilité in vitro de la matière organique est calculé pour chaque erlenmeyer et pour chaque sachet de la même façon que pour le coefficient de digestibilité in vivo : $dMO_v, \% = 100 * (MO \text{ aliment} - MO \text{ du résidu}) / MO \text{ aliment}$ où MO aliment et MO résidu correspondent aux poids de matière organique dans l'aliment et dans le résidu, obtenus par différence entre les quantités de matière sèche et de matières minérales mesurées à l'issue de l'incinération de l'aliment ou du résidu.

1.3. Calculs et analyses statistiques

L'effet série d'analyses (ou répétabilité) a été évalué à partir des mesures répétées sur l'échantillon de blé (114 et 51 mesures pour respectivement les méthodes 1 et 2). La comparaison des deux méthodes d'incubation a été effectuée par analyse de variance, d'une part, sur les données obtenues avec l'échantillon de blé (n=165) et, d'autre part, sur les données des 183 échantillons (n=1080 pour 113 aliments et 68 matières premières) avec prise en compte des effets échantillon et méthode. La précision de chaque méthode est appréciée par l'écart type résiduel (ETR) de ces analyses de variance appliquées aux données obtenues avec chaque méthode d'une part sur le blé témoin et d'autre part sur les 183 aliments. Les équations de prédiction de dMO, dE et ED à partir de dMOv et de critères chimiques ont été calculées par régression multiple progressive sur les données obtenues sur les régimes. La valeur de dMOv est la moyenne d'au moins trois mesures réalisées sur chaque échantillon et pour chaque méthode. L'effet de la granulation des aliments complets sur les coefficients des équations de prédiction a été mesuré par analyse de covariance. Enfin, des équations de régression entre les valeurs observées et les valeurs prédites de dMO (dMOp) ou dE (dEp) ou ED (EDp) ont été établies dans l'étape d'évaluation de la méthode, tant pour les régimes que pour les matières premières. Le logiciel SAS (1990) a été utilisé pour toutes les analyses.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse des données a fait très rapidement apparaître que les dMOv de deux aliments complets en farine et contenant de la graine de colza broyée «normalement» et non granulée et des deux graines de colza qu'ils contenaient étaient

très supérieures aux valeurs de dMO alors que pour l'ensemble des aliments, y compris des aliments contenant de la graine de colza mais aplatie et/ou granulée, les valeurs étaient relativement proches (figure 1). Cette observation rejoint les résultats de SKIBA et al (2002) qui mettaient en évidence l'importance d'un traitement technologique approprié (aplatissage ou granulation) pour maximiser la digestibilité (in vivo) de la matière organique ou de l'énergie de la graine de colza. Il en résulte que la méthode in vitro utilisée ne rend pas compte de la relative indisponibilité in vivo des matières grasses dans ce cas précis. En conséquence, les données de ces deux aliments et des deux graines de colza ont été exclues de l'analyse des données et les résultats présentés portent en définitive sur 113 aliments complets dont 79 avaient été granulés et 66 matières premières, soit un total de 179 aliments (tableau 1).

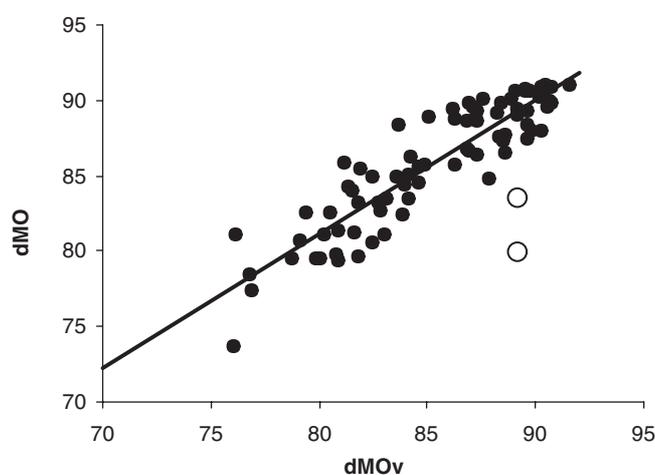


Figure 1 - Relation entre les digestibilités in vivo (dMO, %) et in vitro de la matière organique (dMOv, %) des aliments complets de l'étude (aliments en farine : ● et équation en trait plein ; ○ : graine de colza)

2.1. Aspects méthodologiques

L'analyse répétée de l'échantillon de blé fait apparaître un effet série d'analyses ($P < 0,01$) sur dMOv pour les deux méthodes ; pour la méthode 1, les valeurs moyennes de dMOv par série varient de 89,4 à 90,6, soit un écart maximum voisin d'un point. L'écart type résiduel (ETR) de l'analyse de variance qui prend en compte l'effet série pour chaque méthode est faible mais il est plus élevé pour la méthode 2 que pour la méthode 1 (0,6 vs 0,4 point de dMOv). Enfin, la méthode 2 conduit à une valeur de dMOv significativement plus élevée (90,9 vs 90,1).

L'analyse de variance conduite sur les résultats de dMOv obtenues sur les 179 aliments confirme que la méthode 2 conduit à une valeur de dMOv plus élevée (81,8 vs 81,0 ; $P < 0,01$). L'analyse de variance sur les données de chaque méthode fait également apparaître que l'ETR est faible et comparable pour les deux méthodes (0,7 point de dMOv) ; il est également comparable pour les régimes et les matières premières. La régression établie sur les données moyennes de dMOv par aliment (n=183) montre que dMOv par la

méthode 2 est strictement proportionnelle à dMO_v par la méthode 1 ; l'équation suivante a été obtenue : $DMO_2 = 1,009 DMO_1$ (ETR=1,2). Dans la suite des calculs, seuls les résultats obtenus avec la méthode 1 (ou méthode de référence) ont été retenus. Il n'existe pas à notre connaissance d'information comparable sur la précision des méthodes in vitro d'estimation de la valeur nutritionnelle des aliments.

2.2. Equations de prédiction de la digestibilité de la matière organique ou de l'énergie et de la teneur en énergie digestible à partir de la digestibilité in vitro de la matière organique.

L'analyse de covariance sur les données des aliments complets a fait apparaître que les coefficients des équations de prédiction selon des modèles comme ceux indiqués dans le tableau 2 étaient affectés par le traitement technologique appliqué (farine vs granulés). Toutefois, pour les modèles présentés dans le tableau 2, seule l'ordonnée à l'origine était affectée ($P < 0,01$) par le traitement technologique. A titre indicatif, pour une dMO_v donnée, la dMO et la dE sont de respectivement 0,8 et 1,9 point plus élevées lorsque l'aliment est granulé (équations 5 et 10). De la même façon, la teneur en ED est de 0,35 MJ (par kg de matière sèche) plus élevée que la valeur prédite (équation 14). Les données du tableau 1 illustrent cette situation. En d'autres termes, les équations établies sur les aliments en farine sous-estiment les

valeurs de dMO, dE et ED pour des aliments granulés. En conséquence, les équations proposées ont été calculées uniquement sur les aliments complets présents sous forme de farine (tableau 2).

Les équations obtenues sur les 79 aliments complets sont présentées dans le tableau 2. Le premier prédicteur retenu est toujours dMO_v (ou MOD_v pour ED) mais la prédiction est améliorée par l'introduction d'un critère de parois végétales (ADF ou cellulose brute). Une telle combinaison du critère dMO_v et de la cellulose brute était suggérée par VAN DER MEER et PEREZ (1992). La teneur en matières minérales contribue également à améliorer la prédiction. Dans le cas de l'estimation de la teneur en ED, la teneur en matières grasses de l'aliment rentre logiquement comme estimateur. L'ETR des équations obtenues dans notre étude est plus faible que celui des équations proposées par VAN DER MEER et PEREZ (1992) ou BOISEN et FERNANDEZ (1997), notamment lorsque des critères chimiques complémentaires à dMO_v (ou MOD_v) sont pris en compte. On peut également mentionner que l'ETR des différentes équations proposées est plus faible ou du même ordre que celui d'équations de prédiction uniquement basées sur des critères chimiques (1,5 à 2,5 pour dE selon NOBLET et PEREZ, 1993 et LE GOFF et NOBLET, 2001). Toutefois, ces dernières équations prennent généralement en compte un estimateur de la totalité des parois végétales (NDF par exemple) dont la répétabilité et la précision du dosage sont moins bonnes que pour dMO_v.

Tableau 2 - Equations de prédiction de la digestibilité de la matière organique (dMO, %) et de l'énergie (dE, %) et des teneurs en énergie digestible et nette (ED et EN, MJ/kg de matière sèche) des aliments du porc à partir de la digestibilité in vitro de la matière organique (dMO_v, %), de la quantité de matière organique digestible in vitro (MOD_v, % de la matière sèche) et de quelques caractéristiques chimiques (% de la matière sèche).

N°	Equation ^a	R ²	RSD
1	$dMO = 9,7 + 0,893 dMO_v$	0,82	1,7
2	$dMO = 31,6 + 0,671 dMO_v - 0,67 CB$	0,87	1,4
3	$dMO = 36,7 + 0,651 dMO_v - 0,60 CB - 0,64 MM$	0,89	1,4
4	$dMO = 36,2 + 0,624 dMO_v - 0,70 ADF$	0,88	1,4
5	$dMO = 40,9 + 0,608 dMO_v - 0,63 ADF - 0,61 MM$	0,90	1,3
6	$dE = 0,976 dMO_v$	0,77	2,0
7	$dE = 30,1 + 0,663 dMO_v - 0,77 CB$	0,84	1,7
8	$dE = 35,5 + 0,640 dMO_v - 0,68 CB - 0,68 MM$	0,85	1,6
9	$dE = 36,2 + 0,602 dMO_v - 0,82 ADF$	0,85	1,6
10	$dE = 41,0 + 0,585 dMO_v - 0,74 ADF - 0,64 MM$	0,87	1,5
11	$ED = 0,189 MOD_v$	0,60	0,57
12	$ED = 1,12 + 0,168 MOD_v + 0,184 MG$	0,83	0,37
13	$ED = 5,02 + 0,127 MOD_v + 0,172 MG - 0,124 CB$	0,87	0,33
14	$ED = 6,05 + 0,116 MOD_v + 0,166 MG - 0,135 ADF$	0,88	0,32
15	$EN = 2,42 + 0,078 MOD_v + 0,041 Ami + 0,203 MG - 0,099 CB$	0,94	0,22
16	$EN = 3,22 + 0,072 MOD_v + 0,039 Ami + 0,197 MG - 0,109 ADF$	0,94	0,20

(équations établies à partir des données de 79 aliments complets présentés en farine ; tous les coefficients sont significatifs à $P < 0,01$)

^a MM : matières minérales, CB : cellulose brute, ADF : Acid detergent fibre, Ami : amidon ; dMO_v et MOD_v selon la méthode 1 ; EN calculée à partir des équations 4 et 5 de NOBLET et al (1994)

Nos résultats montrent que la méthode de digestibilité in vitro de la matière organique appliquée dans notre étude est capable de prédire avec une précision très satisfaisante la digestibilité in vivo de la matière organique ; les valeurs moyennes de dMO et dMOv sont d'ailleurs très comparables (85,9 et 85,2 ; tableau 1). La méthode in vitro simule donc bien en moyenne ce qui se passe in vivo chez le porc en croissance. L'introduction des critères ADF ou cellulose brute et matières minérales dans les équations est probablement à relier au fait que ces deux composants affectent les sécrétions endogènes ou, de façon plus générale, la digestion chez le porc. Il faut toutefois remarquer que la méthode in vitro utilisée dans notre étude ne permet pas une digestion maximale de la matière organique puisque les valeurs de dMOv sont au plus égales aux valeurs de dMO mesurées chez le porc en croissance et a fortiori inférieures aux valeurs in vivo que l'on mesurerait chez la truie adulte (LE GOFF et NOBLET, 2001). Des adaptations de la méthode pour notamment mieux simuler la digestion dans le gros intestin seraient à étudier pour estimer la situation de la truie adulte.

2.3. Evaluation des équations de prédiction ; application aux matières premières

Comme indiqué ci-dessus, les équations proposées dans le tableau 2 ont été obtenues sur des aliments complets en farine. Nous avons mis en évidence que leur application à des aliments qui ont été granulés conduit en moyenne à une sous-estimation d'environ 2 % de la teneur en ED ou de la dE. L'analyse de covariance indique que l'effet granulation affecte uniquement l'ordonnée à l'origine de ces équations. En pratique, les équations du tableau 2 peuvent donc être appliquées à des aliments ayant subi une granulation, à la condition de majorer les valeurs estimées de dE ou ED de respectivement 1,8 point et 0,35 MJ/kg de matière sèche. Toutefois, cette correction moyenne ne saurait simuler des effets particuliers de la granulation.

La meilleure évaluation des équations proposées aurait été de mesurer la dMOv d'échantillons totalement étrangers aux aliments ayant servi à établir les équations et comparer les valeurs prédites de dMO, dE ou ED aux valeurs mesurées pour ces échantillons. En dehors des aliments présentés en granulé dont nous avons déjà discuté, nous ne disposons pas de cette base de données. Nous avons donc évalué les équations sur un ensemble de matières premières également mesurées in vivo sous forme de farine et dont les valeurs de dE ou dMO étaient très variables (tableau 1). Il faut toutefois remarquer que ces matières premières étaient pour la plupart incluses dans les aliments complets ayant servi à l'établissement des équations de prédiction. La figure 3 montre que si l'on exclut les graines de colza broyées, les valeurs de dE prédites et mesurées sont hautement corrélées ($r=0,97$), l'équation de régression ayant une pente très proche de l'unité (1,01) et une ordonnée à l'origine nulle. On peut cependant constater une dispersion plus élevée pour les valeurs faibles de dE qui correspondent à des produits comme de la paille et des téguments (colza, tournesol, cacao, etc.). Il faut également reconnaître que, pour ces produits, les valeurs in vivo sont entachées d'une erreur très

importante. Il est donc clair que la démarche employée permet de prédire avec une précision satisfaisante les valeurs de dE et ED des matières premières. A l'inverse, les équations de prédiction de dE ou ED établies sur des régimes à partir des seuls critères chimiques sont difficilement applicables aux matières premières (NOBLET, 1996). Des équations spécifiques à des groupes de matières premières ayant une origine botanique commune est recommandée. En d'autres termes, la prise en compte de dMOv permet d'atténuer partiellement, voire totalement, ces effets origine botanique de la matière première sur la précision de la prédiction.

BOISEN et FERNANDEZ (1997) ont proposé une équation de prédiction de dE à partir de dMOv (tableau 1). On peut considérer que les valeurs de dMOv obtenues par ces auteurs et celles que nous avons mesurées sont équivalentes. Il est alors possible de comparer les valeurs estimées de dE à partir de leur équation à celles que nous avons mesurées tant pour les régimes (figure 2) que pour les matières premières (figure 3). Ces deux figures comme les données moyennes rapportées dans le tableau 1 (dEp2) montrent que dE est sous-estimée lors de l'application de l'équation proposée par BOISEN et FERNANDEZ (1997) ; elle est d'environ 3 points pour l'ensemble des 79 régimes et de 4 points pour les 66 matières premières (tableau 1). De plus, la sous-estimation est d'autant plus importante que l'aliment a une valeur de dE faible. En dehors d'un biais systématique dans la mesure de dMOv entre les deux laboratoires, les raisons de cet écart ne sont pas évidentes. On peut évoquer le fait que les valeurs de dE et dMO de nos essais ont été obtenues sur des porcs pesant 60-65 kg, soit à un poids vif plus élevé que dans les essais de BOISEN et FERNANDEZ (1997). Par ailleurs, la démarche utilisée par ces auteurs pour l'établissement de leur équation de prédiction est relativement opposée à la nôtre puisqu'ils ont établi leur équation à partir de données obtenues sur des matières premières avec comme avantage que l'étendue des valeurs mesurées était très importante mais également comme inconvénient des valeurs in vivo

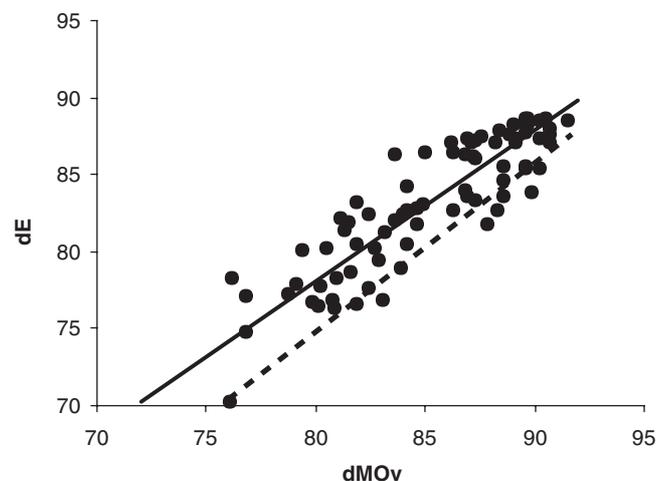


Figure 2 - Relation entre la digestibilité de l'énergie (dE, %) et la digestibilité in vitro de la matière organique (dMOv, %) des aliments complets de l'étude (dE in vivo pour la présente expérience : ● et droite en trait plein ; relation entre dE prédite selon l'équation de BOISEN et FERNANDEZ, 1997 et les valeurs de dMOv mesurées : droite en trait pointillé)

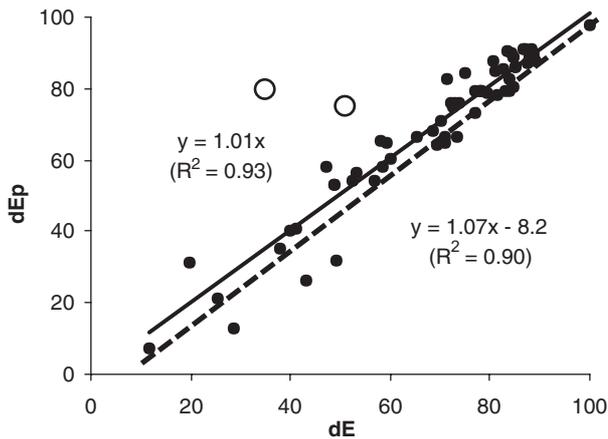


Figure 3 - Relation entre la digestibilité prédite de l'énergie (équation 10 de tableau 2) et la digestibilité in vivo de l'énergie de 66 matières premières (données de la présente expérience : ● et trait plein ; ○ : graine de colza ; valeurs prédites à partir de l'équation de BOISEN et FERNANDEZ, 1997 : droite en pointillé)

obtenues par calcul et probablement moins fiables que des données mesurées directement comme celles de notre étude sur les aliments complets. On peut enfin remarquer que le modèle utilisé par BOISEN et FERNANDEZ (1997) peut être amélioré au prix d'un seul critère chimique supplémentaire (cellulose brute ou ADF) dont la précision de la mesure est satisfaisante (les matières minérales sont mesurées lors de la mesure de dMOv).

2.4. Application à la prédiction de la teneur en énergie nette des aliments

La valeur énergétique des aliments du porc est généralement appréciée sur la base de la teneur en énergie nette

(EN) (NOBLET et al, 1994 ; INRA et AFZ, 2002). Une première solution pour l'estimer à partir de MODv consiste à estimer d'abord la teneur en ED à partir des équations rapportées dans le tableau 2 puis à utiliser cette valeur ED dans l'une des équations proposées par NOBLET et al (1994) pour le calcul de la teneur en EN. Une autre solution consiste à utiliser l'une des deux équations rapportées dans le tableau 2 et donnant directement une estimation de la teneur en EN à partir de MODv et de quelques caractéristiques chimiques.

CONCLUSIONS

Notre étude conduite sur un grand nombre d'aliments a montré que l'on peut estimer avec une précision satisfaisante la teneur en ED des aliments du porc, tant les aliments complets que les matières premières, avec une précision satisfaisante à partir de la mesure de la digestibilité in vitro de la matière organique. Par ailleurs, la méthode de mesure de la digestibilité in vitro est, malgré sa complexité, précise et répétable. Les limites ou les réserves à l'application de la démarche ont été évaluées dans le cas des aliments ayant subi une granulation. Son extrapolation à l'estimation de la valeur énergétique des aliments pour la truie n'a pas été évoquée dans ce texte. Des équations similaires à celles obtenues pour le porc en croissance seront proposées ; toutefois, la démarche proposée par l'INRA et l'AFZ (2002) peut d'ores et déjà être appliquée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la CCPA (Janzé, 35) pour leur collaboration technique et leurs encouragements dans le déroulement de ce programme de travaux. Gwenola LE GOFF qui a participé lors de son travail de thèse à l'INRA à une partie des travaux doit également être remerciée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUFRERE J., GRAVIOU D., DEMARQUILLY C., PEREZ J.M., ANDRIEU J., 1996. Anim. Feed Sci. Technol. 62, 77-90.
- BERTRAND D., 2002. INRA Prod. Anim. 15, 209-219.
- BOISEN S., FERNANDEZ J.A., 1997. Anim. Feed Sci. Technol. 68, 277-286.
- FURUYA S., SAKAMOTO K., TAKAHASHI S., 1979. Br. J. Nutr. 41, 511-520.
- INRA, AFZ, 2002. Tables de composition et de valeurs nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Sauvant D., Perez J.M., Tran G., Eds. INRA Editions, Versailles, 293 p.
- LE GOFF G., NOBLET J., 2001. Journées Rech. Porcine en France 33, 211-220.
- NOBLET J., 1996. In «Recent Advances in Animal Nutrition». 207-231. P.C. Garnsworthy, J. Wiseman and W. Haresign éd., Nottingham University Press, Nottingham.
- NOBLET J., FORTUNE H., DUBOIS S., HENRY Y., 1989. Nouvelles bases d'estimation des teneurs en énergie digestible, métabolisable et nette des aliments du porc. INRA éd., Paris, 106 p.
- NOBLET J., PEREZ J.M., 1993. J. Anim. Sci. 71, 3389-3398.
- NOBLET J., SHI X.S., FORTUNE H., DUBOIS S., LECHEVESTRIER Y., CORNIAUX C., SAUVANT D., HENRY Y., 1994. Journées Rech. Porcine en France 26, 235-250.
- SAS, 1990. SAS/STAT, User's guide (Release 6.07), SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA.
- SKIBA F., NOBLET J., CALLU P., EVRARD J., MELCION J.P., 2002. Journées Rech. Porcine en France 34: 67-74.
- VAN BARNEVELD R.J., NUTALL J.D., FLINN P.C., OSBORNE B.G., 1999. J. Near Infrared Spectrosc. 7, 1-7.
- VAN DER MEER J.M., PEREZ J.M., 1992. J. Sci. Food Agric. 59, 359-363.

