

Prédiction par méta-analyse de la teneur en acides aminés digestibles standardisés des céréales (blé, orge, maïs et sorgho) chez le porc

*Farouk MESSAD (1), Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1), Edith CHARBONNEAU (1),
Daniel SAUVANT (2), Frédéric GUAY (1)*

(1) Université Laval, Département des sciences animales, 2425, rue de l'Agriculture, Québec, G1V 0A6, Canada

*(2) AgroParisTech, UMR791 Modélisation systémique appliquée aux ruminants, 16 rue Claude Bernard,
75231 Paris Cedex 05, France*

frederic.guay@fsaa.ulaval.ca

Prédiction de la valeur nutritionnelle en acides aminés essentiels des céréales (blé, orge, maïs et sorgho) : méta-analyse.

Les céréales constituent l'une des classes d'ingrédients les plus importantes en alimentation porcine. Cependant, l'utilisation de ces ingrédients nécessite une connaissance précise de leurs valeurs nutritionnelles, notamment de leur teneur en acides aminés essentiels digestibles standardisés (dAAE, g/kg aliment). Cette dernière peut varier en fonction notamment de l'origine botanique des céréales, des conditions de culture, de récolte et d'entreposage. Une méta-analyse a été réalisée sur des données publiées entre 1981 et 2013 répertoriant 33 études incluant 130 traitements alimentaires. Cette base de données a été utilisée pour établir des modèles de prédiction du coefficient de digestibilité iléale standardisée (DIS) des AAE ainsi que de la teneur en dAAE à partir de la composition chimique des ingrédients rapportée dans les publications. Les effets du type de céréale (blé, orge, maïs et sorgho), des procédures chirurgicales et du poids vif (PV) des animaux (PV \leq 25 kg, PV $>$ 25 kg) ont été aussi testés dans chaque modèle. En traitant séparément les céréales, il a été possible d'établir des modèles de prédiction de la DIS de plusieurs AAE seulement pour le blé avec comme variable indépendante la protéine brute (PB) (lysine, thréonine, méthionine, isoleucine, leucine et valine, R^2 de 65 à 80%) ou le NDF (lysine, thréonine, méthionine, isoleucine, leucine et valine, R^2 de 70 à 79%). Pour la teneur en dAAE, des modèles ont été obtenus en divisant les céréales en deux sous-classes, blé-orge et maïs-sorgho, avec la PB comme meilleur prédicteur pour tous les AAE avec des R^2 variant de 58 à 99%.

Prediction of the nutritional value of essential amino acids in cereals (wheat, barley, corn and sorghum): meta-analysis.

Cereals are one of the most important classes of ingredients in pig diet. However, the use of these ingredients requires a precise knowledge of their nutritional values, in particular their content of digestible standardized essential amino acids (dEAA, g/kg) which can vary, notably in the botanical origin and the cultivation, harvesting and storage conditions of the crops. A meta-analysis was performed on a database compiling data from 33 studies published between 1981 and 2013 and 130 dietary treatments. Models of prediction of standardized ileal digestibility (SID) of EAA as well as the concentration of dEAA were set up, based on the chemical composition of ingredients reported in publications. The effect of the type of cereals (wheat, barley, corn and sorghum), surgical procedures, and body weight (BW) (BW \leq 25 kg BW, BW $>$ 25 kg) were also tested in each model. By dealing with each cereal separately, it was possible to establish predictive models of SID of AAE for wheat only with crude protein (CP) as an independent variable for many EAA (lysine, threonine, methionine, isoleucine, leucine and valine, R^2 from 65 to 80%) or with NDF (lysine, threonine, methionine, isoleucine, leucine and valine, R^2 from 70 to 79%). For dEAA content, models were obtained by dividing the cereals into two subclasses, wheat-barley and corn-sorghum, with CP as the independent variable for all dEAA with R^2 ranging from 58-99%.

INTRODUCTION

L'un des principaux objectifs lors de la formulation des régimes alimentaires destinés aux porcs en croissance est de fournir les acides aminés essentiels (AAE) en quantité suffisante pour maximiser la croissance tout en réduisant l'excrétion d'azote. Les céréales constituent l'une des classes d'ingrédients les plus importantes en alimentation porcine. Cependant, l'utilisation de ces ingrédients nécessite une connaissance précise de leurs valeurs nutritionnelles. En particulier, la digestibilité iléale standardisée (DIS) des AAE peut varier en fonction principalement du stade physiologique des animaux (Nitravová *et al.*, 2006 ; Mariscal-Landin *et al.*, 2008), de l'origine botanique des céréales (Cromwell *et al.*, 2000), des laboratoires d'analyse (Sprague et Dudley, 1988 ; Cromwell *et al.*, 2003) et des méthodes de détermination de la digestibilité (Jansman *et al.*, 2002). Bien qu'il existe des tables de valeurs nutritionnelles des ingrédients répertoriant la digestibilité (ex. : Sauvant *et al.*, 2004 ; NRC, 2012), ces valeurs sont des moyennes qui ne tiennent pas compte de l'importante variation dans la composition des ingrédients bien qu'elles aient été corrigées afin de mettre en cohérence l'ensemble des composantes (Savant *et al.*, 2004). Par exemple, la variation du contenu en protéines peut atteindre près de 10% pour les céréales à paille (Patience, 1996), et des variations de 7% pour la digestibilité des AAE du maïs sont rapportées (Pedersen *et al.*, 2007). L'analyse fréquente des ingrédients est donc importante, mais difficile à faire en routine pour les AAE par les fabricants d'aliments. Cependant, des analyses chimiques de base, telles que la protéine brute (PB) et les fibres peuvent être réalisées en routine. L'objectif de cette étude consiste à développer par une approche méta-analytique des modèles de prédiction de la digestibilité iléale standardisée des AAE et de la teneur en acides aminés digestibles standardisés (dAAE) des céréales à partir de leur composition chimique simple.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Collecte des données et codage

Une base de données a été construite par une compilation exhaustive des publications avec comité de lecture à partir de moteurs de recherche connus (Pubmed, CAB, Agricola), pour les céréales où il existe suffisamment de littérature chez le porc : le blé, l'orge, le maïs et le sorgho. La DIS ou à défaut la digestibilité iléale apparente (DIA) des AAE, et des caractéristiques chimiques, telles que la PB, la cellulose brute (CB), le NDF, l'ADF, l'ADL, l'hémicellulose et le contenu en AAE ont été compilées. Dans les cas où nous n'avions que la DIA, la DIS a été évaluée à partir d'équations préalablement déterminées (données non-publiées). Les publications dont les régimes incluaient des additifs ou des substances susceptibles de modifier la digestibilité, tels que les enzymes exogènes (phytases, carbohydrases, protéases), ont été écartées. La base finale contenait 130 traitements provenant de 33 essais publiés entre 1981 et 2012. Pour les valeurs manquantes en fibres, plusieurs modèles de prédiction ont été établis à partir des données pour lesquelles il ne manquait aucune information. La base de données inclut des informations sur les publications, les animaux (poids vif (PV), interventions chirurgicales mises en œuvre pour collecter les jus intestinaux (canule et anastomose) et sexe) et les caractéristiques nutritionnelles et chimiques des traitements alimentaires (DIS, DIA, PB, AAE, CB, NDF, ADF, ADL, hémicellulose).

1.2. Exploration du méta-dispositif et analyses statistiques

L'analyse des données a été précédée par une analyse en composante principale (ACP) (Minitab, version 16, State College, PA), pour visualiser la structure de la population afin de choisir le nombre de classes de céréales le plus pertinent.

Une représentation graphique des données prises deux à deux a tout d'abord été réalisée afin d'avoir une représentation globale de l'hétérogénéité et de la cohérence des données ainsi que de la nature et de l'importance des liaisons entre les variables aux niveaux intra et inter-études. Cette visualisation graphique a également permis de repérer les valeurs aberrantes ou influentes. Des statistiques descriptives ont été générées pour chaque variable. Les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant la procédure GLM (Minitab). Comme suggéré par Sauvant *et al.* (2005), l'effet fixe de l'étude a été privilégié car les jeux de données utilisés pour l'analyse comprenaient un nombre réduit d'études et les différences méthodologiques entre les publications constituaient un effet lié à la publication (et donc à l'étude) qui ne pouvait pas être considéré comme aléatoire. Les relations entre DIS des AAE et dAAE, et la composition chimique (PB, CB, ADF, NDF, ADL et hémicellulose) ont été étudiées avec un modèle de variance-covariance : $Y_{ij} = \mu + \beta X_{ij} + \beta_i X_{ij} + \Delta_i + e_{ij}$, où i est l'indice du facteur étude, j l'indice du numéro de traitement, Y_{ij} la variable expliquée, μ l'ordonnée à l'origine générale, β le coefficient de régression, X_{ij} la variable explicative, β_i l'effet fixe de l'étude i sur le coefficient général du modèle, Δ_i le facteur de correction spécifique à chaque type d'ingrédients et e_{ij} l'erreur résiduelle aléatoire. L'analyse de la normalité des résidus par le test de Shapiro-Wilk, le calcul des effets de levier et de la distance de Cook ont été effectués pour déceler les valeurs aberrantes ou influentes.

2. RESULTATS

L'ACP a mis en évidence deux classes de céréales, la première regroupe le blé et l'orge et la seconde le sorgho et le maïs (résultats non présentés).

2.1. Prédiction de la digestibilité

Il a été possible de déterminer une valeur moyenne corrigée pour les DIS en tenant compte de l'effet étude pour chacune des céréales (Tableau 1). Pour le blé et l'orge, la valeur de la DIS des AAE différait de ± 3 points avec les valeurs publiées par Sauvant *et al.* (2004) et le NRC (2012) alors que des écarts plus importants ont été observés pour le maïs (± 5 points). La DIS du tryptophane (Trp) du blé (69%) était plus faible que celles publiées dans les tables INRA-AFZ (Savant *et al.*, 2004) et NRC (2012). Pour le sorgho, les valeurs de DIS de l'arginine (Arg), histidine (His), isoleucine (Ile), méthionine (Met) et de la thréonine (Thr) étaient proches (± 3 points) des résultats publiés par Sauvant *et al.* (2004), alors que pour les autres AA, les valeurs étaient plutôt comparables (± 3 points) au NRC (2012). Il n'a pas été possible d'obtenir des modèles de prédiction de la DIS en utilisant les deux classes de céréales. La DIS des AAE a donc été étudiée pour chacune des céréales. Avec cette approche, des modèles ont été obtenus pour l'Ile, la lysine (Lys), la leucine (Leu), la Thr, et la valine (Val) mais pour le blé seulement. L'analyse statistique a en effet montré une relation linéaire positive entre la DIS des AAE et la PB avec une pente variant de 0,19 à 0,38 ($P < 0,01$; Tableau 2) à l'exception de l'Arg, l'His et la Met pour lesquels la PB n'était pas associée avec leur digestibilité.

Tableau 1 –Nombre d'échantillons, moyenne et écart-type de la concentration en protéine brute et des coefficients de DIS¹ des acides aminés pour les céréales

Constituant		Blé	Orge	Maïs	Sorgho
Protéine brute, g/kg	Nombre d'échantillons	38	47	39	26
	Moyenne	127,9	104,4	117,2	103,1
	Écart-type	2,4	7,4	3,8	2,4
DIS Lysine, %	Nombre d'échantillons	26	32	32	23
	Moyenne	83,1	79,3	75,9	81,2
	Écart-type	1,1	2,7	0,9	2,7
DIS Thréonine, %	Nombre d'échantillons	27	33	30	25
	Moyenne	82,1	77,4	77,7	79,3
	Écart-type	1,1	2,6	1,8	1,1
DIS Méthionine, %	Nombre d'échantillons	25	34	32	20
	Moyenne	86,8	82,7	86,9	83,9
	Écart-type	0,6	1,6	1,3	1,6
DIS Tryptophane, %	Nombre d'échantillons	10	13	21	6
	Moyenne	69,1	81,4	77,4	74,2
	Écart-type	2,5	2,9	1,5	3,5
DIS Isoleucine, %	Nombre d'échantillons	28	33	30	26
	Moyenne	88,1	82,6	83,5	81,2
	Écart-type	0,6	2,1	1,4	1,1
DIS Leucine, %	Nombre d'échantillons	27	33	30	26
	Moyenne	88,5	83,1	88,8	82,5
	Écart-type	0,6	1,8	0,6	1,1
DIS Valine, %	Nombre d'échantillons	26	33	30	23
	Moyenne	86,3	83,0	83,3	72,0
	Écart-type	0,9	1,4	1,3	1,2
DIS Arginine, %	Nombre d'échantillons	27	33	28	23
	Moyenne	92,6	86,4	87,4	85,0
	Écart-type	0,6	2,0	0,9	1,2
DIS Histidine, %	Nombre d'échantillons	21	34	30	25
	Moyenne	89,2	81,2	84,0	79,1
	Écart-type	0,5	1,7	0,8	1,8
DIS Phénylalanine, %	Nombre d'échantillons	21	32	28	25
	Moyenne	91,6	85,8	87,3	83,3
	Écart-type	0,7	1,8	1,3	1,2

¹DIS : digestibilité iléale standardisé.

Quant à l'ordonnée à l'origine, elle était significativement différente de 0 ($P < 0,05$) pour tous les modèles et variait entre 32% et 93%. Concernant l'effet du NDF, l'analyse graphique et statistique a montré un impact négatif sur la DIS pour tous les AAE, à l'exception de l'Arg et l'His, (Tableau 3) avec une pente variant de -0,10 à -0,22 ($P < 0,01$) et une ordonnée à l'origine significativement différente de 0 pour les AAE ($P < 0,05$). Pour le Trp et la Phe, aucune relation n'a pu être établie entre la composition et la DIS. Dans cette étude, aucune interaction entre NDF et PB n'a pu être établie. Enfin, ces deux variables étant inversement corrélées, il n'a pas été possible de combiner ces deux éléments dans les mêmes modèles.

Pour les autres céréales, la composition proximale n'a pu être associée avec la DIS des AAE. L'analyse globale des DIS pour tous les AAE n'a montré aucun effet du PV, du sexe ou de la

procédure chirurgicale utilisée pour collecter les fluides intestinaux ($P > 0,10$) sur l'évaluation de la DIS.

2.2. Prédiction de la teneur en acides aminés digestibles

En utilisant les deux classes de céréales (blé-orge et maïs - sorgho), l'analyse statistique a montré une relation linéaire entre les dAAE et la PB avec une pente générale variant de 0,008 à 0,072 pour les modèles blé-orge ($P < 0,05$; Tableau 4) et de 0,01 à 0,13 dans le cas du maïs-sorgho ($P < 0,05$; Tableau 5). L'ordonnée à l'origine était généralement significativement différente de 0 ($P < 0,05$) sauf pour l'Arg, l'Ile, la Thr et le Trp dans le cas du groupe blé-orge et pour l'His, l'Ile, la Leu et la Phe pour le groupe du maïs-sorgho. Des corrections de l'ordonnée à l'origine en fonction du type de céréale ont également été obtenues pour les AAE du blé ($P < 0,05$) à l'exception de Lys, Met et Thr, alors que pour le maïs la

correction de l'ordonnée était significative pour la Lys et la Met uniquement ($P < 0,05$). Pour le groupe blé-orge, des corrections spécifiques de la pente en fonction de la céréale ont été

obtenues pour l'Arg, l'His, la Leu, la Phe et la Val ($P < 0,05$). Dans le groupe maïs-sorgho, ces corrections de la pente étaient significatives ($P < 0,05$) seulement pour l'Arg, l'His et la Thr.

Tableau 2 – Prédiction du coefficient de la DIS¹ des acides aminés essentiels du blé à partir de la protéine brute (PB)

Variabiles Y DIS, %	Lysine	Thréonine	Méthionine	Isoleucine	Leucine	Valine	Arginine	Histidine
Nombre d'études	15	15	13	15	15	15	13	14
Nombre de traitements	31	32	28	32	32	32	24	27
Ordonnée à l'origine	40,56	32,25	74,22	62,83	62,94	48,17	81,79	93,04
Erreur-type	14,86	14,06	9,19	9,08	9,03	11,27	7,91	22,45
Probabilité ²	*	*	***	***	***	***	***	***
PB, g/kg matière sèche	0,325	0,380	0,09	0,193	0,196	0,291	0,081	-0,029
Erreur-type	0,113	0,111	0,07	0,069	0,069	0,086	0,059	0,172
Probabilité ²	*	**	ns	*	*	**	ns	ns
Erreur résiduelle	4,11	3,89	2,55	2,51	2,5	3,11	2,17	2,19
R²	80	80	77	75	70	65	32	36

¹DIS : digestibilité iléale standardisée. ²***, $P < 0,001$; **, $P < 0,01$; *, $P < 0,05$; ns, $P > 0,10$.

Tableau 3 – Prédiction de la DIS¹ des acides aminés essentiels du blé à partir du NDF

Variabiles Y DIS, %	Lysine	Thréonine	Méthionine	Isoleucine	Leucine	Valine	Arginine	Histidine
Nombre études	15	15	13	15	15	15	13	14
Nombre traitements	31	32	28	32	32	32	24	27
Ordonnée à l'origine	104,1	106,1	96,9	102	101	105,2	98,7	80,1
Erreur-type	7,61	7,17	3,86	4,28	4,5	5,59	3,87	9,14
Probabilité ²	***	***	***	***	***	***	***	***
NDF, g/kg matière sèche	-0,161	-0,184	-0,220	-0,106	-0,978	-0,146	-0,047	0,071
Erreur-type	0,058	0,054	0,090	0,033	0,034	0,042	0,029	0,071
Probabilité ²	*	**	*	**	*	**	ns	ns
Erreur résiduelle	4,15	3,97	1,84	2,37	2,49	3,10	2,11	2,11
R²	80	79	73	77	70	66	36	37

¹DIS : Digestibilité iléale standardisée. ²***, $P < 0,001$; **, $P < 0,01$; *, $P < 0,05$; ns, $P > 0,10$.

3. DISCUSSION

L'objectif de ce projet était d'établir des modèles de prédictions de la DIS des AAE et de la teneur en dAAE pour différents types de céréales (blé, orge, maïs et sorgho). Pour la DIS, aucun modèle n'a pu être établi pour l'orge, le maïs et le sorgho, *i.e.* aucune des caractéristiques de l'aliment analysé dans les études n'était associée avec la DIS des AAE. Néanmoins, l'effet étude était largement significatif ($P < 0,001$) (résultats non présentés) permettant ainsi de prendre en compte des facteurs propres à chacune des études tels que l'effet laboratoire lors du dosage de la PB (Cromwell *et al.*, 2003) et des AA (Cromwell *et al.*, 2000). Par exemple pour le maïs, Kil *et al.* (2014) n'ont rapporté aucune différence de la DIS des AAE, sauf la Lys, pour neuf lots de maïs provenant des États-Unis et de l'Afrique du Sud. Pour l'orge, Fan et Sauer (2003) ont noté des différences significatives de la DIA des AAE pour six lots provenant de différents sites de culture. Cependant, ces mêmes auteurs n'ont pas rapporté d'association significative entre la teneur en NDF et la DIA des AAE pour l'orge, comme nos résultats l'ont montré pour la DIS. Mariscal-Landin *et al.* (2005) n'ont noté aucune différence de DIA des AAE entre de l'orge (haut niveau de NDF) et de l'orge à grains nus (faible niveau de NDF) pour des porcs en croissance. Des modèles ont été développés dans notre étude pour le blé à l'exception de l'Arg, l'His, la Phe et le Trp pour lesquels aucune variable indépendante n'avait d'influence significative sur leur DIS. Cela peut s'expliquer par la faible variation de la

DIS de l'Arg, l'His et la Phe comparativement aux autres AA tel que la Lys (Arg = $92,5\% \pm 2,64$ vs Lys = $83,1\% \pm 9,23$) ou par le faible nombre d'observations pour le Trp. Pour l'Ile, la Leu, la Lys, la Thr et la Val, un effet positif de la teneur en PB et négatif du NDF a été observé avec des modèles comparables, alors que pour la Met seul l'effet négatif de NDF était significatif. Ainsi, plus la teneur en PB est élevée plus la digestibilité de ces AA l'est. Par exemple, une augmentation de 10% de la PB augmente la DIS de la Lys de 3%. De fortes teneurs en NDF dans le blé semblent diminuer la digestibilité des AAE. Ce résultat est en accord avec ceux de Fan *et al.* (2001) qui notaient une corrélation négative entre la teneur en NDF et la DIA des AAE (sauf l'Arg) pour six différentes sources de blé. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que la paroi cellulaire de l'endosperme et la couche d'aleurone des graines sont très riches en hémicelluloses, composantes majeures du NDF (Chabeauti *et al.*, 1991). En effet dans le blé, le rapport hémicellulose/CB est proche de 3,5 tandis que dans le maïs et l'orge il est proche 2,6, et de 2,2 dans le sorgho. Donc, le blé contient 25% d'hémicellulose de plus que le maïs et l'orge et 38% de plus que le sorgho. Il est à noter que l'hémicellulose était également significative associée avec la DIS des AAE dans la présente étude, mais que pour des raisons pratiques le NDF a été préféré compte tenu que ce critère est davantage utilisé dans les laboratoires commerciaux. Selon Lechevestrier (1996), le NDF (fibres insolubles) a tendance à piéger les AAE dans

l'intestin, réduisant ainsi la dégradation des parois végétales et la libération des contenus cellulaires notamment le substrat protéique. Néanmoins, l'effet du NDF sur la DIS des AAE est contrasté dans la littérature en fonction de l'ingrédient

probablement en raison du rapport entre les différents polymères constituant le NDF (lignine, cellulose, et hémicellulose). Dans un second temps, des modèles de prédiction de la teneur en dAAE, correspondant au flux iléal

Tableau 4 – Prédiction du contenu en acides aminés digestibles de la classe blé-orge à partir de la protéine brute (PB)

Variable Y DIS ¹ , g/kg matière sèche	Lysine	Thréo- nine	Méthio- nine	Trypto- phane	Iso- leucine	Leucine	Valine	Arginine	Histidine	Phényl- alanine
Nombre études	14	13	14	7	14	13	13	13	12	12
Nombre traitements	54	56	59	30	55	53	54	54	50	50
Ordonnée à l'origine	1,12	0,14	0,76	0,1	0,366	-1,71	2,32	-1,3	1,49	3,2
Erreur-type	0,321	0,571	0,279	0,249	0,411	0,772	0,668	1,2	0,377	0,669
Probabilité ²	***	ns	**	ns	ns	*	***	ns	***	***
PB, g/kg matière sèche	0,017	0,023	0,008	0,008	0,026	0,072	0,021	0,055	0,008	0,019
Erreur-type	0,002	0,004	0,002	0,002	0,003	0,006	0,005	0,01	0,003	0,005
Probabilité ²	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Blé (correction-ordonnée)										
Moyenne				0,11	0,18	-1,26	1,74	2,99	1,18	3,35
Erreur-type				0,05	0,07	0,66	0,57	1,03	0,32	0,57
Probabilité ²				*	*	t	**	**	***	***
PB x Blé (correction-pente)										
Moyenne						0,011	-0,013	-0,023	-0,007	-0,024
Erreur-type						0,005	0,004	0,008	0,002	0,004
Probabilité ²						*	***	**	**	***
Erreur résiduelle	0,202	0,442	0,177	0,153	0,306	0,404	0,414	0,801	0,199	0,359
R²	87	58	76	66	83	91	78	78	83	92

¹DIS : digestibilité iléale standardisée. ²***P < 0,001 ; **P < 0,01 ; *P < 0,05 ; t 0,05 < P ≤ 0,10 ; ns P > 0,10.

Tableau 5 – Prédiction du contenu en acides aminés digestibles de la classe maïs-sorgho à partir de la protéine brute (PB)

Variable Y DIS ¹ , g/kg matière sèche	Lysine	Thréo- nine	Méthio- nine	Trypto- phane	Iso- leucine	Leucine	Valine	Arginine	Histidine	Phényl- alanine
Nombre études	14	16	15	10	24	16	23	16	16	22
Nombre traitements	52	55	53	49	113	57	109	54	59	107
Ordonnée à l'origine	0,662	0,416	0,911	-0,382	0,176	-1,05	1,041	1,31	0,128	0,27
Erreur-type	0,292	0,236	0,244	0,124	0,2	1,34	0,235	0,445	0,274	0,273
Probabilité ²	*	t	***	**	ns	ns	***	**	ns	ns
PB, g/kg matière sèche	0,015	0,023	0,017	0,01	0,028	0,125	0,034	0,026	0,021	0,041
Erreur-type	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002	0,013	0,002	0,004	0,003	0,002
Probabilité ²	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Maïs (correction-ordonnée)										
Moyenne	0,46	-0,446	0,284					-0,655	-0,171	
Erreur-type	0,057	0,23	0,045					0,456	0,283	
Probabilité ²	***	t	***					ns	ns	
PB x Maïs (correction-pente)										
Moyenne		0,007						0,012	0,005	
Erreur-type		0,002						0,004	0,002	
Probabilité ²		**						**	*	
Erreur résiduelle	0,171	0,138	0,147	0,13	0,275	0,812	0,328	0,251	0,165	0,372
R²	89	93	99	85	86	83	93	89	88	89

¹DIS : digestibilité iléale standardisée. ²***, P < 0,001 ; **, P < 0,01 ; *, P < 0,05 ; t, 0,05 < P ≤ 0,10 ; ns, P > 0,10.

d'absorption, ont été développés par classe d'ingrédients (blé-orge et maïs-sorgho). L'ordonnée à l'origine positive pour plusieurs AAE avec des valeurs plus élevées pour le blé, suivi de l'orge et dans une moindre mesure pour le maïs et le sorgho, montre qu'un flux significatif d'AAE serait observé malgré l'absence d'une source protéique alimentaire. En théorie, l'ordonnée ne devrait pas différer de 0 considérant que la valeur de dAAE a été corrigée pour les pertes endogènes basales. Ces valeurs de l'ordonnée peuvent être biaisées par le fait que la majorité des données de la base ne comportait pas de valeurs avec de faibles concentrations en PB. Il est aussi possible que ces valeurs reflètent des pertes endogènes spécifiques qui pourraient varier selon la céréale ou dans une moindre mesure d'une synthèse *de novo* pour certains AA (Stein *et al.*, 2007 ; Columbus *et al.*, 2012). Concernant le choix des prédicteurs potentiels du contenu en dAAE, il a été modulé par les corrélations entre variables et surtout la facilité du dosage des composants nutritionnels. Ainsi, la PB a été privilégiée comme prédicteur aux dépens des AAE, bien que le contenu en AAE ait été associé positivement avec la teneur en dAAE dans la présente étude. Par exemple pour l'orge, Fan et Sauer (2002) ont également montré que le contenu en AAE digestibles apparents était corrélé avec le contenu en AAE totaux. A l'opposé, la PB est analysée couramment par les fabricants d'aliments, ce qui leur permet

de prédire facilement la teneur en dAAE des céréales sans passer par la détermination des AAE. Des effets du type de céréale sur la pente montrent que de façon générale l'effet de la PB est moins marqué pour le blé que pour l'orge et plus marqué pour le maïs que pour le sorgho. Cela peut être expliqué par des coefficients moyens de variation de 1,85, 3,25, 7,06 et 2,32% pour la PB, respectivement pour le blé, l'orge, le maïs et le sorgho.

CONCLUSION

Le secteur de l'alimentation animale est à la recherche de moyens simples et rapides pour évaluer la valeur nutritionnelle des ingrédients utilisés dans les formules alimentaires. L'objectif de ce travail était d'établir, par méta-analyse, des modèles facilement utilisables sur le terrain pour prédire la valeur nutritionnelle en dAAE des céréales. Les résultats confirment qu'il est possible de prédire la digestibilité de certains AAE à partir de la composition chimique, soit la PB et le NDF, en accord avec la physiologie digestive. Bien que des modèles aient pu être développés, une partie de la variance demeure non expliquée nécessitant davantage d'études afin de mieux prendre en compte les différents facteurs agissant sur la digestibilité des AAE tels que le type de technologie appliquée lors de la fabrication des aliments, les facteurs anti-nutritionnels et la présence d'enzymes exogènes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chabeauti E., 1991. Digestion sectorielle des constituants pariétaux chez le porc. Evaluation par différentes procédures chirurgicales et analytiques. Thèse, Université Rennes 1, 191 p.
- Columbus D., Lapiere H., Fuller M.F., Htoo J. K., de Lange C.F.M., 2012. The impact of lower gut nitrogen supply on nitrogen balance and urea kinetics in growing pigs fed a valine limiting- diets. *J. Anim. Sci.*, 90, 62-64.
- Cromwell G.L., Cline T.R., Crenshaw J.D., Crenshaw T.D., Easter R.A., Ewan R.C., Hamilton C.R., Hill G.M., Lewis A.J., Mahan D.C., Nelssen J.L., Pettigrew J.E., Veum T.L., Yen J.T., 2000. Variability among sources and laboratories in analyses of wheat middlings. NCR-42 Committee on Swine Nutrition. *J. Anim. Sci.*, 78, 2652-2658.
- Cromwell G.L., Brendemuhl J.H., Chiba L.I., Cline T.R., Crenshaw T.D., Dove C.R., Easter R.A., Ewan R.C., Ferrell K.C., Hamilton C.R., Hill G.M., Hitchcock J.D., Knabe D.A., Kornegay E.T., Lewis A.J., Libal G.W., Lindemann M.D., Mahan D.C., Maxwell C.V., McConnell J.C., Nelssen J.L., Pettigrew J.E., Southern L.L., Veum T.L., Yen J.T., 2003. Variability in mixing efficiency and laboratory analyses of a common diet mixed at 25 experiment stations. *J. Anim. Sci.*, 81, 484-491.
- Fan M.Z., Sauer W.C., 2002. Determination of true ileal amino acid digestibility and the endogenous amino acid outputs associated with barley samples for growing-finishing pigs by the regression analysis technique. *J. Anim. Sci.*, 80, 1593-1605.
- Fan M.Z., Sauer W.C., 2003. Determination of variability of apparent ileal amino acid digestibility values in barley samples for growing-finishing pigs with dual digestibility markers. *J. Anim. Feed Sci.*, 12, 785-802.
- Fan M.Z., Sauer W.C., Li S., 2001. Variability of apparent ileal amino acid digestibility in high-protein wheat samples for growing-finishing pigs. *J. Anim. Feed Sci.*, 10, 103-118.
- Jansman A.J.M., Smink W., van Leeuwen P., Rademacher M., 2002. Evaluation through literature data of the amount and amino acid composition of basal endogenous crude protein at the terminal ileum of pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 98, 49-60.
- Kil D.Y., Park C.S., Son A.R., Ji S.Y., Kim B.G., 2014. Digestibility of crude protein and amino acids in corn grains from different origins for pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 196, 68-75.
- Lechevestrier Y., 1996. Digestion et absorption des acides aminés dans l'intestin grêle du porc. Effets de la composition des protéines alimentaires, de leurs propriétés physiques et des facteurs antinutritionnels. Thèse Institut national agronomique Paris-Grignon, 166 p.
- Mariscal-Landin G., Rodriguez J.E.L., Reis de Souza T.C., 2005. Evaluation of hullless barley as feed ingredient in growing-finishing pigs diets: amino acid ileal digestibility. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 120, 169-176.
- Mariscal-Landin G., Reisdouza T., Parras J., Aguilerab A., Marb B., 2008. Ileal digestibility of protein and amino acids from canola meal in weaned piglets and growing pigs. *Lives. Sci.*, 116, 53-62.
- Nitrayová S., Heger J., Patráš P., Brestenský M., 2006. Effect of body weight and pig individuality on apparent ileal digestibility of amino acids and total nitrogen. *Slovak J. Anim. Sci.*, 39, 65-68.
- NRC, 2012. Nutrient Requirement of Swine. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC, 210 p.
- Patience J.F., 1996. Precision in swine feeding programs: An integrated approach. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 59, 137-145.
- Pedersen C., Boersma M.G., Stein H.H., 2007. Energy and nutrient digestibility in NutriDense corn and other cereal grains fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 85, 2473-2483.
- Sauviant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage Porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. 2ème édition revue et corrigée. INRA Editions, Versailles. 304 p.
- Sauviant D., Schmidely P., Daudin J.J., 2005. Les méta-analyses des données expérimentales : applications en nutrition animale. *INRA Prod. Anim.*, 18, 63-73.
- Stein H.H., Seve B., Fuller M.F., Moughan P.J., de Lange C.F., 2007. Invited review: Amino acid bioavailability and digestibility in pig feed ingredients: terminology and application. *J. Anim. Sci.*, 85, 172-180.
- Sprague G.F., Dudley J.W., 1988. Corn and corn improvement (3rd Ed.). Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, 699 p.

*Les références de la base de données sont disponibles auprès de frederic.guay@fsaa.ulaval.ca.