

Digestion dans l'intestin grêle chez le porc

V. Importance de la variabilité non contrôlée ; modélisation des profils moyens de transit iléo-caeco-colique par régression polynomiale

J.P. LAPLACE, Béatrice DARCY et Odile PONS *

I.N.R.A., Laboratoire de Physiologie de la Nutrition,

** Laboratoire de Biométrie,*

Centre de Recherches zootechniques, F 78350 Jouy-en-Josas

Résumé

Les effets de l'amidon et de la source de protéines alimentaires (combinaison factorielle 2×2) sur la digestion dans l'intestin grêle ont été rapportés dans un travail antérieur. Les quantités résiduelles de matière fraîche, matière sèche, amidon et azote franchissant la jonction ileo-caeco-colique chez le porc au cours des 24 h après un repas d'épreuve ont été décrites dans ces conditions. Le présent travail, effectué sur les mêmes observations a pour objectif : (i) l'étude de l'importance des sources de variation autres que le régime compte tenu des contraintes particulières de ce type d'expérimentation ; (ii) la recherche d'une modélisation du passage des digesta à la jonction iléo-caeco-colique sous forme d'une fonction du temps.

L'influence des variations individuelles sur le passage des digesta est surtout importante lors des périodes de faible débit de matériaux exogènes et de fort débit relatif de matériaux endogènes. De plus l'influence de facteurs non contrôlés par le plan d'expérience, notamment la réaction particulière de chaque individu à chaque repas d'épreuve, s'avère prééminente par rapport à celle des facteurs contrôlés dans le cas de la matière fraîche, de la matière sèche et de l'amidon.

Le passage des digesta à l'extrémité distale de l'intestin grêle (quantités cumulées) peut être modélisé par ajustement polynomial des données. Cette procédure permet tout à la fois de réunir sous forme graphique simple toutes les informations nécessaires à la compréhension des phénomènes et à leur évaluation correcte, et de fournir une comparaison globale (tests de parallélisme et d'égalité) des profils moyens de passage des digesta selon la nature du régime alimentaire. Cette possibilité de tester globalement la similitude vs. la différence de profils apporte une meilleure systématisation que la classique succession de comparaisons de quantités recueillies à divers instants d'observation.

I. Introduction

L'influence de la nature de l'amidon et de la source de protéines alimentaires sur la cinétique de passage des digesta et le bilan de la digestion au niveau de la jonction iléo-caeco-colique a été récemment étudiée chez le porc (DARCY, LAPLACE & VILLIERS,

1981). La comparaison des cinétiques de passage de la matière sèche, de l'amidon ou de l'azote, telle qu'elle a été réalisée, se réduit à celle des quantités recueillies à la suite du repas d'épreuve, et ayant atteint la jonction iléo-caeco-colique au cours de telle ou telle période d'observation définie par les horaires de collecte. Cette approche repose donc sur une série discontinue de données quantitatives non cumulées. Il serait cependant intéressant de disposer d'un mode d'expression des phénomènes permettant de décrire le passage des digesta à la jonction iléo-caeco-colique pour aboutir à une comparaison de profils de passage continus selon la nature du régime.

Par ailleurs, dans l'analyse des facteurs contrôlés susceptibles de rendre compte des variations enregistrées, le facteur répétition des épreuves quotidiennes (dit « effet nyctémère ») a été étudié (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981). Toutefois l'analyse réalisée a consisté à tester le rang du jour d'épreuve (premier jour vs. deuxième jour ... vs n^{ième} jour) tous régimes et porcs confondus. Cette approche, importante dans la mesure où elle a permis d'exclure une évolution (i.e. détérioration) systématique de la préparation animale étudiée, ne rend cependant pas compte de la variabilité d'un jour à l'autre des réponses d'un porc donné face à un régime alimentaire donné. Or ce n'est guère qu'à l'égard des quantités résiduelles d'azote recueillies à la jonction iléo-caeco-colique que des effets significatifs des facteurs contrôlés (nature de l'amidon, source de protéines et leur interaction) ont été enregistrés (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981). La question se pose donc de savoir si l'absence quasi-complète d'effets significatifs à l'égard des 3 autres variables contrôlées (quantités résiduelles de matière fraîche, matière sèche et amidon) ne serait pas la conséquence d'une importance relative très grande de facteurs non contrôlés tels que cette variabilité de réponse individuelle lors de chaque épreuve.

L'objet du présent travail, complémentaire de l'étude antérieure dont il ne remet en aucune façon en cause les conclusions, est donc double : 1) évaluer l'ampleur de la variation particulière pour chaque repas d'épreuve chez un porc recevant un aliment expérimental donné relativement à celle qui relève des facteurs contrôlés ; 2) tenter de représenter le passage à la jonction iléo-caeco-colique à l'aide d'une fonction du temps pour aboutir à la comparaison de profils continus.

II. Matériel et méthodes

L'expérience concernée répond à un schéma factoriel 2×2 , fondé sur les combinaisons de deux amidons purifiés (maïs et blé) et de deux sources de protéines (farine de poisson et gluten de blé). Les données utilisées sont les quantités de matière fraîche, matière sèche, amidon et azote, collectées 4, 6, 8, 10, 14 et 24 heures après ingestion d'un repas d'épreuve de l'un ou l'autre des quatre régimes expérimentaux. Les caractéristiques des régimes, la préparation des animaux (fistule iléo-colique post-valvulaire), les modalités de collecte, d'échantillonnage et d'analyse des digesta, ainsi que les observations réalisées ont été rapportées en détail dans le précédent article (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981).

Dans l'analyse antérieurement conduite, l'intégralité des résultats expérimentaux a été prise en compte en dépit de quelques données manquantes (dispositif non orthogonal). Dans le cas présent, seuls ont été considérés les nyctémères d'épreuve pour lesquels toutes les mesures ont pu être effectuées (dispositif orthogonal), soit systématiquement

5 jours d'épreuve pour chacun des 2 porcs affectés à chacun des 4 régimes. Par ailleurs, les quantités résiduelles recueillies à l'extrémité distale de l'intestin grêle et exprimées en pourcentage des quantités ingérées correspondantes font l'objet pour le présent travail d'un cumul d'instant en instant d'observation au long des 24 heures, dans la perspective d'une expression du passage des digesta sous une forme continue au fil du temps.

A. Etude de la variabilité des observations

Les quantités cumulées de matière fraîche, matière sèche, amidon et azote, recueillies à la jonction iléo-caeco-colique à chacun des 6 instants d'observation, sont considérées successivement. Pour chacune de ces mesures, une analyse de variance étudie la variabilité des observations en fonction des paramètres contrôlés. L'effet nyctémère n'est pas pris en compte, l'influence éventuelle du rang du jour d'épreuve ayant été écartée par l'étude antérieure (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981). Les jours d'épreuve sont donc considérés comme équivalents. Aussi, les paramètres contrôlés retenus pour l'analyse de variance sont : le régime (couple amidon \times protéine) et le porc. D'autres facteurs ne sont pas contrôlables. Ce sont l'erreur de mesure d'une part, et d'autre part la variation particulière liée à chaque repas pour un même porc.

Chaque observation se décompose donc sous la forme :

$$Y_{ijkl} = \mu + a_i + b_j + (ab)_{ij} + C_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Dans cette écriture, μ représente une moyenne générale ; a_i est l'effet de l'amidon i (1,2) ; b_j est l'effet de la protéine j (1,2) ; $(ab)_{ij}$ est le terme d'interaction entre l'amidon et la protéine. Le terme C_{ijk} est l'effet dit « effet porc », qui dépend ici du régime ij puisqu'un porc n'est soumis qu'à un seul des 4 régimes étudiés. L'attribution d'un régime à un porc ayant été effectuée au hasard lors de la mise en place de l'expérience, l'effet porc en tant que tel est aléatoire. Enfin ε_{ijkl} , ou résiduelle, regroupe les facteurs non contrôlés.

B. Régression polynômiale et profils de passage des digesta

La recherche d'une formulation simple exprimant le passage des digesta ($Y =$ quantité recueillie pour telle ou telle variable contrôlée) en fonction du temps écoulé après le repas, nous a conduit à appliquer aux matériaux franchissant la jonction iléo-caeco-colique la même technique que celle utilisée antérieurement pour les contenus gastriques franchissant le pylore (LAPLACE & TOMASSONE, 1970 ; LAPLACE *et al.*, 1981).

On calcule les coefficients du polynôme de degré maximum (soit de degré 5, compte tenu des 6 instants d'observation) qui définit la courbe représentative la mieux ajustée à la courbe constituée par les valeurs observées (quantités cumulées). L'ajustement polynômial de l'ensemble des données concernant chacun des régimes permet la comparaison des courbes moyennes exprimant l'évolution au cours du temps de la quantité considérée ayant franchi la jonction iléo-caeco-colique. La comparaison des profils de passage est fondée sur celle des coefficients polynômiaux des ajustements moyens pour chaque régime et chacune des variables. Les profils sont ainsi comparés deux à deux par les tests d'égalité et de parallélisme.

Par ailleurs, en raison de la difficulté d'interprétation des coefficients du degré le plus élevé, on a recherché pour chaque variable et chaque régime le degré minimum

permettant un bon ajustement. Pour cela, on procède à un test de significativité des coefficients par un test de Fisher des régressions des divers degrés (degré 4 vs. degré 5, ..., degré 1 vs. degré 5). Il résulte de ces tests des degrés minimum (1 ou 2 selon le cas), indiqués dans le tableau 1 pour chaque régime et chacune des variables étudiées, qui permettent une expression graphique plus simple des profils moyens de passage des digesta. Cette approche graphique peut être complétée par un examen comparatif des valeurs numériques des coefficients polynômiaux en imposant, pour une même variable, un même degré pour les 4 polynômes représentatifs des quatre régimes.

TABLEAU 1

Ajustement polynômial des quantités cumulées dans le cas de chacun des régimes : degré minimum des polynômes fournissant le meilleur ajustement.

Polynomial adjustment of the cumulated quantities for each diet : minimum degree of the best fitting polynoms.

Régime	Amidon <i>Starch</i>	Maïs <i>Maize</i>	Maïs <i>Maize</i>	Blé <i>Wheat</i>	Blé <i>Wheat</i>
<i>Diet</i>	Protéine <i>Protein</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	Gluten <i>Wheat gluten</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	Gluten <i>Wheat gluten</i>
Variable contrôlée : <i>Controlled variable</i>					
Matière fraîche <i>Wet digesta</i>		D° 2	D° 1	D° 2	D° 2
Matière sèche <i>Dry matter</i>		D° 2	D° 2	D° 2	D° 2
Amidon <i>Starch</i>		D° 1	D° 1	D° 1	D° 1
Azote <i>Nitrogen</i>		D° 2	D° 1	D° 2	D° 1

III. Résultats et discussion

A. Sources de variabilité autres que les effets fixes du régime

Les effets liés au régime, analysés antérieurement (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981), ne seront pas exposés ici. Rappelons seulement qu'au-delà des effets de la nature de l'amidon d'une part et de la source de protéines d'autre part, l'existence d'une interaction amidon-protéines est déjà fort gênante pour l'expérimentateur dans la mesure où elle interdit de définir une fois pour toutes l'influence de tel ou tel constituant considéré isolément. Une difficulté supplémentaire tient au protocole, chaque porc étant affecté au hasard à un seul régime. Le fait de ne pouvoir utiliser tous les

régimes chez tous les porcs tient évidemment aux contraintes techniques antagonistes de ce type de travail : durée expérimentale des préparations chirurgicales, nécessité de multiplier les jours d'épreuve pour chaque régime et d'intercaler des périodes d'accoutumance. Il faut en outre souligner que n'est pas prise en compte l'éventualité d'un effet rémanent, donc d'une influence de l'ordre d'utilisation des différents régimes. Cette observation est à rapprocher du fait que le passé nutritionnel des animaux, antérieurement à leur utilisation expérimentale, fait aussi l'objet d'un postulat de constance. Le cumul de ces divers écueils rend évidemment difficile l'analyse des effets expérimentaux étudiés (effets régime).

1. Variabilité liée à l'animal

Dans ce contexte, l'importance du facteur animal est *a priori* considérable. Evaluée au travers de l'interaction régime-porc (du fait du dispositif expérimental), cette influence est loin d'être négligeable comme le montrent les pourcentages de la variance expliqués par cette interaction aux divers instants de mesure et pour chacune des variables contrôlées (tabl. 2). Dans le cas de la matière fraîche et de la matière sèche collectées à la jonction iléo-caeco-colique, la plus forte variabilité (24 à 28 p. 100) du fait de cette interaction est enregistrée pour les quantités recueillies au cours des 4 premières heures post-prandiales, soit la période précédant l'arrivée du repas d'épreuve (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1980 a), c'est-à-dire une période de collecte des ultimes résidus du repas antérieur et de matériaux d'origine essentiellement endogène. On conçoit donc que ces quantités soient effectivement variables en fonction de caractéristiques individuelles. Par contre, l'effet de cette interaction n'est pas significatif à l'égard des quantités totales collectées en 24 heures. En ce qui concerne l'amidon, substance d'origine exclusivement exogène (alimentaire), c'est au-delà de la septième heure post-prandiale que la variabilité du fait de l'interaction régime-porc excède 20 p. 100. Compte tenu de la cinétique de passage de l'amidon résiduel à la suite d'un repas d'épreuve (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1980 b), cette particularité s'avère correspondre à la forte variabilité entre porcs de la phase terminale d'évacuation gastrique et de digestion du repas. Mais là encore, cette influence n'est pas suffisante pour affecter significativement la quantité totale d'amidon résiduel recueillie en 24 heures. Enfin, concernant l'azote résiduel, qui représente un mélange en proportions variables d'azote exogène (alimentaire) et d'azote endogène (sécrétions, desquamation...), le pourcentage de variance expliqué par l'interaction régime-porc est élevé (26 p. 100) au cours des 4 premières heures post-prandiales qui correspondent pour l'essentiel au balayage de matériaux endogènes avant l'arrivée du repas à la jonction iléo-caeco-colique (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1980 b). L'importance de la variabilité au cours de cette période dépend donc bien des particularités individuelles des phénomènes de sécrétion et desquamation, c'est-à-dire de l'effet porc. La variabilité est ensuite faible durant la période de passage de l'essentiel des matériaux exogènes du repas ; elle est à nouveau importante à partir de la dixième heure lorsque la part respective de l'azote endogène redevient prépondérante dans la quantité totale d'azote recueillie à la jonction iléo-caeco-colique. Au total, l'importance quantitative globale de l'azote endogène fait que l'effet d'interaction régime porc est significatif à l'égard des quantités totales d'azote collectées en 24 heures.

Il est donc évident que la variabilité, étudiée pour l'effet d'interaction régime-porc, traduit pour l'essentiel une variabilité inter-animaux dans la mesure où :

- (i) pour les matériaux exclusivement (amidon) ou principalement (matière fraîche,

matière sèche) d'origine exogène cet effet n'est important que lors des périodes de faible passage de ces matériaux exogènes ;

(ii) pour l'azote, cet effet de l'animal est surtout important lors des périodes au cours desquelles la fraction endogène représente une part relative accrue de l'azote total.

TABLEAU 2

Importance de l'effet d'interaction porc-régime : Pourcentage de la variance expliqué par cet effet et valeur de F à comparer au seuil 5 p. 100, $F_{4,31} = 2,68$.

Importance of the interaction pig-diet : Percentage of the variance supported by this effect and F value to be compared at the 5 p. 100 treshold, $F_{4,31} = 2.68$.

Variable contrôlée Controlled variable		Instant d'observation (en heures après le repas d'épreuve) Collection time (hours after feeding the test meal)					
		4	6	8	10	14	24
Matière fraîche ... <i>Wet digesta</i>	p. 100	28,05	13,42	15,51	15,63	16,45	6,75
	F	3,49*	2,00	1,93	2,02	2,46	1,00
Matière sèche <i>Dry matter</i>	p. 100	24,12	8,71	11,81	18,13	22,65	8,77
	F	2,82*	1,17	1,38	2,59	3,79*	1,20
Amidon <i>Starch</i>	p. 100	14,85	15,81	22,60	24,22	23,17	20,79
	F	1,55	1,73	2,91*	3,22*	2,88*	2,58
Azote <i>Nitrogen</i>	p. 100	26,55	7,11	8,75	9,34	14,26	12,26
	F	3,01*	1,74	2,51	3,75*	6,14*	3,20*

* Effets significatifs - *Significant effects.*

2. Variabilité du fait de facteurs non contrôlés

A cette influence de l'animal, plus ou moins importante selon les instants au cours de la cinétique post-prandiale, s'ajoute un effet non contrôlé lié à la réaction particulière de tout porc affecté à un régime face à chaque repas d'épreuve. Cet effet constitue l'un des éléments englobés dans la résiduelle du modèle d'analyse de variance. Le pourcentage de la variance afférent à cette résiduelle est dans l'ensemble très important (tabl. 3). Ces pourcentages, de l'ordre de 53 à 64 p. 100 pour la matière fraîche, et de 48 à 68 p. 100 pour la matière sèche, font que les effets contrôlés du régime n'ont qu'une importance relative modérée dans l'explication des variations observées. Cela est encore plus vrai dans le cas de l'amidon (60 à 77 p. 100 de la variance sont afférents à la résiduelle). Par contre, ce pourcentage de variance relevant de facteurs non contrôlés est plus réduit pour l'azote (18 à 32 p. 100) sauf au cours des 4 premières heures de collecte (71 p. 100) qui précèdent l'arrivée des digesta du repas d'épreuve. Ce dernier point pourrait rendre compte, en toute hypothèse, d'une stimulation très variable de la production d'azote endogène lors de l'ingestion d'un repas, de même que la forte variabilité non contrôlée de la matière fraîche pourrait témoigner d'une interférence très irrégulière d'épreuve à épreuve des apports sécrétoires et des flux hydriques dans le tube digestif. Cependant d'autres observations doivent être formulées.

TABLEAU 3

*Pourcentage de la variance afférent à la résiduelle
c'est-à-dire expliqué par l'ensemble des facteurs non-contrôlés.*

*Percentage of the variance supported by the residual term,
i.e. explained by all uncontrolled factors.*

Variable contrôlée <i>Controlled variable</i>	Instant d'observation (en heures après le repas d'épreuve) <i>Collection time (hours after feeding the test meal)</i>					
	4	6	8	10	14	24
Matière fraîche <i>Wet digesta</i>	64,28	53,60	64,27	61,85	53,47	53,75
Matière sèche <i>Dry matter</i>	68,43	59,46	68,25	56,01	47,84	58,56
Amidon <i>Starch</i>	76,67	72,85	62,10	60,19	64,44	64,57
Azote <i>Nitrogen</i>	70,62	32,66	27,88	19,94	18,59	30,67

Alors que l'amidon représente, selon le régime, de 69,0 à 77,2 p. 100 de la matière sèche ingérée c'est-à-dire la fraction la plus importante de l'aliment consommé, l'amidon résiduel ne représente que 0,95 à 4,97 p. 100 de la matière sèche des digesta collectés à la jonction iléo-caeco-colique, soit encore seulement 0,17 à 0,84 p. 100 de la quantité d'amidon ingérée. Ceci rend sans intérêt l'étude de la variabilité de quantités négligeables d'un point de vue nutritionnel. Il n'existe au demeurant aucune corrélation entre quantités de matière sèche et quantités d'amidon recueillies en 24 heures ($r = 0,06$).

Dans le cas de l'azote qui représente, selon le régime, de 2,5 à 2,7 p. 100 de la matière sèche ingérée (soit encore 15,8 à 17,1 p. 100 en matières azotées totales), la matière sèche des digesta collectés à la jonction iléo-caeco-colique contient encore selon les cas de 1,8 à 2,9 p. 100 d'azote (ou 11,4 à 18,4 p. 100 de matières azotées totales). Cette proportion dans les digesta résiduels représente des quantités d'azote équivalant à 7,9 à 16,5 p. 100 des quantités d'azote ingérées. Ceci signifie que, au niveau de l'extrémité distale de l'intestin grêle et pour les régimes utilisés dont l'amidon est très digestible, les matières azotées constituent une fraction très importante des digesta résiduels. On conçoit ainsi que les quantités de matière fraîche et de matière sèche dépendent étroitement des quantités d'azote résiduel. Cette relation est vérifiée par l'existence de corrélations très significatives ($p < 0,001$) entre les quantités totales de matière fraîche recueillies en 24 h et celles d'azote ($r = 0,59$); la corrélation est encore plus étroite pour les quantités de matière sèche et d'azote ($r = 0,81$). Au demeurant, cette dépendance des quantités de matière sèche et d'azote peut être vérifiée pour chacun des intervalles de collecte ($r = 0,86$ par exemple pour la période sixième à huitième heure post-prandiale).

Ainsi la variabilité non contrôlée très importante des quantités résiduelles de matière fraîche, matière sèche et amidon (tabl. 3) rend improbable l'identification d'effets

significatifs des facteurs contrôlés sur ces variables mesurées, ce que confirme l'étude antérieure (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981). Mais les observations qui précèdent montrent aussi : (i) que, pour des régimes à base d'amidon purifié, la recherche d'effets expérimentaux sur les quantités résiduelles d'amidon est pratiquement sans objet ; (ii) que les effets éventuels des facteurs contrôlés sur la matière fraîche et la matière sèche résiduelles ont toute chance d'être faibles et de n'être que la conséquence des effets de ces mêmes facteurs sur les quantités résiduelles d'azote. Par contre, les effets de la nature de l'amidon, de la source de protéines alimentaires, et de leur interaction sont identifiés comme significatifs à l'égard de l'azote résiduel (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981) d'autant plus aisément que la variabilité du fait des facteurs non contrôlés reste faible dans le cas de l'azote au moins en période de digestion effective (tabl. 3). Ces quelques remarques suggèrent en définitive que la variable azote, outre son importance nutritionnelle propre, constitue le meilleur instrument d'étude des facteurs de variation de la digestion dans l'intestin grêle du porc. Il apparaît même que son efficacité peut être encore accrue en se fondant sur l'analyse des acides aminés de cette fraction azotée. En effet pour 2 des régimes ici étudiés, le coefficient de variation des quantités d'acides aminés totaux ou d'acides aminés individuels dans les digesta recueillis n'excède pas 18 p. 100 (régime maïs-gluten) voire 15 p. 100 (régime maïs-poisson) selon DARCY, LAPLACE & DUEE (1982).

B. Ajustement polynômial des données

Les ajustements de degré minimum obtenus pour chaque régime et chaque variable sont seulement de degré 1 ou 2 (tabl. 1) ce qui suggère une relative régularité des profils moyens de passage pour chaque régime et chaque variable. Ces profils sont présentés dans la figure 1 sur laquelle sont également reportés les résultats des tests de parallélisme et d'égalité réalisés sur les ajustements moyens de degré maximum.

Par ailleurs, la comparaison des profils moyens de passage peut être assurée par l'examen des valeurs numériques des coefficients des polynômes. Ceci peut être réalisé en imposant un même degré pour les 4 polynômes décrivant l'évolution d'une même variable sous 4 régimes différents. Le tableau 4 rassemble les coefficients des polynômes obtenus sous une contrainte de degré 2 pour la matière fraîche, la matière sèche et l'azote, et sous la contrainte du degré 1 pour l'amidon. Ces polynômes sont, dans le cas du degré 2, de la forme $Y = b_0 + b_1t + b_2t^2$ avec $Y =$ quantité résiduelle cumulée franchissant la jonction iléo-caeco-colique, et $t =$ temps écoulé depuis le repas d'épreuve. Les coefficients de ces polynômes portent chacun une signification particulière : b_0 est l'ordonnée à l'origine et rend compte de la plus ou moins grande précocité d'arrivée des digesta au site considéré ; b_1 est la vitesse initiale et traduit donc la vitesse d'arrivée des digesta en ce site ; enfin b_2 , en l'occurrence toujours négatif, correspond à la décélération c'est-à-dire à l'amortissement progressif du passage des digesta résiduels.

L'examen des divers éléments d'information (profils moyens, tests d'égalité et de parallélisme, coefficients des polynômes) montre, dans le cas de la *matière fraîche*, une nette distinction entre les coefficients du polynôme maïs-gluten et ceux correspondant aux autres régimes. Après un repas d'épreuve maïs-gluten, le passage de la matière fraîche à la jonction iléo-caeco-colique débute plus tôt (b_0 le plus petit en valeur absolue) et s'effectue selon un rythme plus faible mais plus régulier (b_1 et b_2 les plus faibles en valeur absolue). Parmi les trois autres régimes dont les résidus arrivent

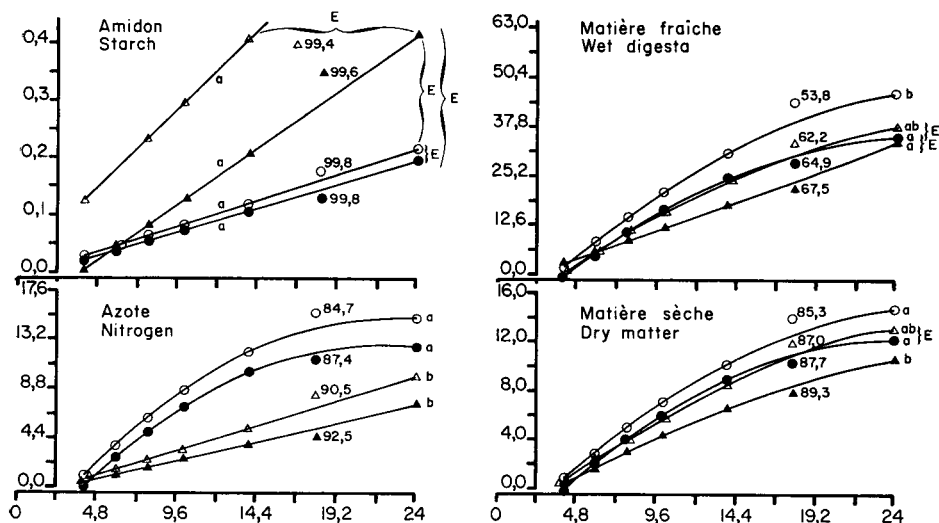


FIG. 1

Curves construites par l'ordinateur décrivant les régressions polynômiales qui expriment la quantité cumulée Y (en pourcentage de la quantité ingérée ; ordonnée) de matière fraîche, matière sèche, amidon et azote total, franchissant la jonction iléo-caeco-colique en fonction du temps X (heures ; abscisse) écoulé depuis le repas d'épreuve.

Computer drawn curves based on polynomial regressions representative of the cumulated amount Y (as percent of the ingested quantity ; ordinate) of wet digesta, dry matter, starch and total nitrogen flowing through the ileo-caeco-colic junction according to time X (hours ; abscissa) elapsed after ingestion of the test meal.

Des courbes affectées d'une même lettre minuscule peuvent être considérées comme parallèles ; des courbes affectées de la lettre E peuvent être considérées comme égales. Les valeurs numériques reportées sur chacun des graphiques sont les digestibilités apparentes, pour les régimes considérés, à l'extrémité distale de l'intestin grêle (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981) - Curves indexed by the same small letter may be considered as parallel ; curves indexed by the letter E may be considered as equal. The values superimposed on each graph are the respective apparent digestibility values of the 4 diets at the distal end of the small intestine (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981).

- Maïs-poisson - Maize starch-fish meal.
- ▲ Maïs-gluten - Maize starch-wheat gluten.
- Blé-poisson - Wheat starch-fish meal.
- △ Blé-gluten - Wheat starch-wheat gluten.

plus tardivement, on note un passage particulièrement rapide de la matière fraîche du régime blé-poisson (b₁ le plus élevé), avec cependant un net ralentissement ultérieur (b₂). Ces caractéristiques peuvent être retrouvées dans l'allure des profils moyens de la figure 1. Les profils moyens de passage de la matière fraîche pour les régimes maïs-poisson, maïs-gluten et blé-gluten peuvent être considérés comme parallèles entre eux. Parmi ceux-ci, les profils maïs-poisson et maïs-gluten peuvent être considérés comme

TABLEAU 4

Régressions polynômiales exprimant pour chacune des variables contrôlées la quantité résiduelle cumulée parvenant à la jonction iléo-caeco-colique en fonction du temps écoulé depuis le repas d'épreuve.

Polynomial regressions representative of the cumulated amounts reaching the ileo-caeco-colic junction for each of the controlled variables as a function of time after intake of each diet.

Variable contrôlée <i>Controlled variable</i>	Nature de l'amidon purifié <i>Kind of purified starch</i>	Source de protéines <i>Protein source</i>	Coefficients de la régression polynômiale <i>Coefficients of the polynomial regression</i>		
			b ₀	b ₁	b ₂
Matière fraîche <i>Wet digesta</i>	Blé <i>Wheat</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,1417	0,0423	— 0,0007
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,1253	0,0343	— 0,0006
	Maïs <i>Maize</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,1486	0,0384	— 0,0007
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0932	0,0267	— 0,0004
Matière sèche <i>Dry matter</i>	Blé <i>Wheat</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,0478	0,0144	— 0,0003
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0432	0,0121	— 0,0002
	Maïs <i>Maize</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,0575	0,0146	— 0,0093
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0291	0,0083	— 0,0001
Amidon <i>Starch</i>	Blé <i>Wheat</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,0001	0,0001	
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0001	0,0003	
	Maïs <i>Maize</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,0001	0,0001	
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0007	0,0002	
Azote <i>Nitrogen</i>	Blé <i>Wheat</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,0607	0,0189	— 0,0004
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0276	0,0076	— 0,0001
	Maïs <i>Maize</i>	Poisson <i>Fish meal</i>	— 0,0681	0,0181	— 0,0004
		Gluten <i>Wheat gluten</i>	— 0,0192	0,0051	— 0,0001

égaux. Il en va de même pour les profils maïs-poisson et blé-gluten. Enfin, seul est accepté le parallélisme entre les profils blé-poisson et blé-gluten. Ainsi, par le seul examen de la figure 1, on peut noter que l'effet sur la matière fraîche de la source de protéines (quantités résiduelles plus importantes avec le poisson) n'est véritablement marqué qu'en association avec l'amidon de blé (interaction) c'est-à-dire dans le cas du régime (amidon de blé-farine de poisson) qui conduit effectivement à l'arrivée la plus rapide et la plus importante de matière fraîche à la jonction iléo-caeco-colique (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981).

La même procédure d'analyse peut être appliquée à chacune des variables contrôlées. Dans le cas de la *matière sèche*, c'est pour le régime maïs-gluten qu'est observée la plus grande précocité, alors qu'à l'opposé, la matière sèche du régime maïs-poisson arrive le plus tardivement. Cela étant, on note que trois profils (blé-poisson, blé-gluten et maïs-poisson) sont parallèles entre eux, et parmi ceux-ci deux sont égaux (maïs-poisson et blé-gluten). Le profil maïs-gluten est nettement distinct des précédents par les caractéristiques décrites par b_1 et b_2 . Ce profil est cependant parallèle au profil blé-gluten. Là encore, l'examen de la figure 1 met en évidence les hiérarchies de passage des quantités résiduelles et donc de digestibilité apparente de la matière sèche, avec des quantités plus importantes pour le poisson que pour le gluten (effet protéine) mais aussi pour le blé que pour le maïs (effet d'interaction).

En ce qui concerne l'*amidon*, l'image apportée par la figure 1 sépare très largement les droites représentatives en raison de l'échelle adoptée. En effet, selon une échelle du même ordre de grandeur que celle utilisée pour les autres variables, les 4 profils ne sont pas dissociables visuellement, les quantités résiduelles d'amidon étant extrêmement faibles. Ceci explique qu'en dépit de l'apparence de la figure 1, les quatre profils soient parallèles, avec de surcroît un certain nombre d'égalités 2 à 2. L'identité des valeurs des coefficients montre qu'il y a une réelle similitude des profils pour les régimes maïs-poisson et blé-poisson. On conçoit ainsi que, si l'effet protéine (quantités résiduelles d'amidon plus importantes pour les régimes gluten) est en moyenne plus important que l'effet amidon (régimes blé vs régimes maïs) ni l'un ni l'autre n'ont de véritable signification au plan digestif et nutritionnel.

En ce qui concerne l'*azote* et pour tous les critères considérés, il y a une nette distinction entre les profils des régimes comportant du poisson et ceux des régimes comportant du gluten, le parallélisme étant accepté au sein de chacun de ces deux groupes. Le passage de l'azote débute beaucoup plus précocement dans le cas des régimes gluten et il s'effectue plus lentement et plus régulièrement. Au-delà de cet effet évident de la source de protéines, on voit aussi apparaître l'influence de l'interaction amidon-protéine dans la mesure où il existe une dissociation selon la nature de l'amidon associé à une même protéine.

Au total, la modélisation du transit des digesta à la jonction iléo-caeco-colique par simple ajustement polynômial des données quantitatives cumulées permet une expression graphique très satisfaisante du phénomène. Les profils moyens continus obtenus (quantités écoulées en fonction du temps post-prandial) peuvent être aisément comparés par les tests de parallélisme et d'égalité ce qui autorise une évaluation globale de la similitude vs. différence entre profils caractéristiques de tel ou tel régime. Cette procédure permet une meilleure systématisation des effets que la succession de comparaisons des quantités recueillies aux divers instants d'observation. Elle peut être complétée par l'examen des valeurs des coefficients des polynômes qui portent, comme pour l'expression polynômiale des profils d'évacuation gastrique, une signification physiologique précise.

IV. Conclusion

L'étude des facteurs de variation des quantités totales de digesta (matière fraîche, matière sèche, amidon et azote) franchissant la jonction iléo-caeco-colique, au cours des 24 heures consécutives à un repas d'épreuve chez le porc, permet de souligner que, au-delà de l'effet des facteurs contrôlés d'origine alimentaire étudiés antérieurement (DARCY, LAPLACE & VILLIERS, 1981), existent d'autres sources de variation d'une importance relative considérable : (i) l'influence de l'animal surtout marquée lors des périodes de faible débit de matériaux exogènes et de fort débit de matériaux endogènes ; (ii) une influence des facteurs non contrôlés, englobant notamment la réaction particulière à chaque repas d'épreuve, qui s'avère prééminente par rapport à celle des facteurs contrôlés dans le cas de la matière fraîche, de la matière sèche et de l'amidon.

Par ailleurs, le passage des digesta à l'extrémité distale de l'intestin grêle peut être « modélisé » par ajustement polynômial des données, procédure qui permet tout à la fois : (i) de réunir sous forme graphique simple toutes les informations nécessaires à la compréhension des phénomènes et à leur évaluation correcte ; (ii) de fournir une comparaison globale des profils moyens de passage des digesta selon la nature du régime alimentaire.

Accepté pour publication en mars 1983.

Summary

Digestion in the pig small intestine.

5. Importance of the uncontrolled sources of variance ; modelisation of mean curves of passage at the ileo-caeco-colic junction using polynomial regression

A previous paper (DARCY, LAPLACE, VILLIERS, 1981) reported the effects of diet composition on digestion (factorial combination of 2 starches and 2 proteins). The residual quantities of wet digesta, dry matter, starch and nitrogen flowing through the ileo-caeco-colic junction in the pig over 24 h following a test-meal, were described in such conditions. This paper, based on the same data aims at : (i) studying the relative importance of other sources of variance than dietary factors, according to the specific restraints of such an experimentation ; (ii) modelling the ileo-caeco-colic passage of digesta as a function of time.

The influence of the between pig variation on digesta passage was shown to be the largest during periods of reduced flow of exogenous materials and high relative flow of endogenous materials. In addition, the influence of uncontrolled sources of variance, mainly the peculiar response of each pig to each a test meal, appeared to prevail over the influence of controlled dietary factors in the case of wet digesta, dry matter and starch passage.

A model of the passage of digesta (cumulated quantities) through the ileo-caeco-colic junction was established using the polynomial adjustment of the data. This procedure allowed to gather in a simple picture (fig. 1) all informations required for the best evaluation and understanding of events. It also allowed an overall comparison (by parallelism and equality tests) of the mean curve of passage of digesta according to the diet. This possibility to test the whole similarity or difference of the curves provided a better systematization of the results than the classical series of comparisons of quantities collected at various intervals.

Références bibliographiques

- DARCY B., LAPLACE J.P., DUEE P.H., 1982. Digestion des protéines dans l'intestin grêle chez le porc. 1. Digestibilité des acides aminés selon la source de protéines d'un régime à base d'amidon de maïs purifié. *Ann. Zootech.*, **31**, 279-300.
- DARCY B., LAPLACE J.P., VILLIERS P.A., 1980 a. Digestion dans l'intestin grêle chez le porc. 2. Cinétique comparée de passage des digesta selon le mode de fistulation, iléocaecale ou iléocolique post-valvulaire, dans diverses conditions d'alimentation. *Ann. Zootech.*, **29**, 147-177.
- DARCY B., LAPLACE J.P., VILLIERS P.A., 1980 b. Digestion dans l'intestin grêle chez le porc. 3. Cinétique du passage de l'amidon et de l'azote au niveau iléal selon le mode de fistulation, la nature de l'amidon et le taux de protéines de l'aliment. *Ann. Zootech.*, **29**, 277-298.
- DARCY B., LAPLACE J.P., VILLIERS P.A., 1981. Digestion dans l'intestin grêle chez le porc. 4. Cinétique de passage des digesta au niveau de la jonction iléo-caeco-colique et bilans de la digestion selon la nature de l'amidon et la source de protéines alimentaires. *Ann. Zootech.*, **30**, 31-62.
- LAPLACE J.P., PONS A., CUBER J.C., KABORE C., VILLIERS P.A., 1981. Effets de la nature de l'amidon (blé ou maïs) et des protéines (poisson ou gluten) sur les facteurs de contrôle et le décours de l'évacuation gastrique d'un régime semi-purifié chez le porc. Applications de l'analyse multidimensionnelle et de la régression polynômiale. *Ann. Zootech.*, **30**, 209-248.
- LAPLACE J.P., TOMASSONE R., 1970. Evacuation gastro-duodénale chez le porc. Fistulation chronique par voie thoracique extra-pleurale; recherche d'une technique d'analyse mathématique de l'évacuation. *Ann. Zootech.*, **19**, 303-332.